الدكتور/ مصطفى محمد السيد



المعدات الأساسية لهندسة التبريد

دار الفكر العربي

المعدات الأساسية لهندسة التبريد

المعدات الأساسية لهندسة التبريد

تأليف

أ. د. مصطفى محمد السيد

أستاذ الهندسة الحرارية – كلية الهندسة
جامعة الملك عبدالعزيز – جدة
المملكة العربية السعودية

دار الفكر العربي

الإدارة : ٩٤ ش عباس العقاد – مدينة نصر
القاهرة ت : ٢٦١٩٠٤٩

٦٢١,٥٦ مصطفى محمد السيد.

م ص م ع المعدات الأساسية لهندسة التبريد/ تأليف مصطفى محمد السيد. ـ القاهرة: دار الفكر العربى، ١٩٩٣.

٤١٢ ص: إيض؛ ٢٤سم.

ببليوجرافية: ص ٤٠٣ ـ ٤٠٥.

يشتمل على ملاحق وكشاف.

تدمك: ١ ـ ٠٦٠٦ ـ ١٠ ـ ٩٧٧.

١ ـ التبريد. أ ـ العنوان.

المحتويات

تقديم

يقدم الكتاب الحالي المعدات الأساسية لنظم التبريد بانضغاط البخار ، ولا يشمل الكتاب النظم الأخرى للتبريد مثل التبريد بالامتصاص ، والتبريد الكهروحراري وغيرها . ويقصد بالمعدات الأساسية تلك المعدات التي لا يمكن لنظام تبريد العمل بدونها ، وهي المبخر والضاغط والمكثف وصمام التمدد . ولا يشمل الكتاب ، منعاً لكبر حجمه ، المعدات المساعدة التي توجد في بعض النظم دون غيرها ، مثل المستقبل ، المجمع ، فاصل الزيت ، منظم ضغط المبخر ، أجهزة التحكم ... الخ . ولقد أُعِدَّ الكتاب ليكون منهجاً دراسياً لمادة هندسة التبريد لطلاب كلية الهندسة ، ويمكن أن تُدَرَّس محتويات الكتاب في فصل دراسي واحد بمعدل ثلاث ساعات محاضرات أسبوعياً ، أو في سنة دراسية كاملة بمعدل محاضرة واحدة لمدة ساعة ونصف أسبوعياً ، هذا بالطبع خلاف ساعات التدريب والمعمل الملحقة بالمنهج الدراسي ، تبعاً لتخطيط هذا المنهج . ولقد أُعِدَّ الكتاب أيضاً ليكون مرجعاً لمهندسي التبريد العاملين في مجال التصميم أو الصيانة أو المقاولات .

يستخدم الكتاب النظام الدولي للوحدات ، وليس وحدات النظام الإنجليزي الشائعة الاستخدام في صناعة هندسة التبريد ، حيث أصبح الاتجاه العالمي في السنوات الأخيرة هو التحول إلى النظام الدولي للوحدات . ويمكن للقارئ استخدام الملحق ب بنهاية الكتاب للتحويل بين هذين النظامين للوحدات .

يقع الكتاب في ثمانية فصول بالإضافة إلى ثلاثة ملاحق . أفردنا الفصل الأول منها لأهمية التبريد في حياتنا ونبذة تاريخية عن نشأة هندسة التبريد ، مع عرض لبعض تطبيقات هندسة التبريد ، وخصصنا الفصل الثاني لعرض نظم التبريد بانضغاط البخار ومكوناتها . المعدات الأساسية – التي هي موضوع الكتاب – تأتي في الفصول من الثالث إلى الثامن : فنقدم المبخرات في الفصل الثالث ، والمكثفات في الفصل الرابع ، والضواغط في الفصول من الخامس إلى السابع ، وأخيراً صمامات التمدد في الفصل الثامن .

ولقد راعينا في معظم أجزاء الكتاب تقديم أمثلة محلولة ما أمكن لتوضيح المعلومات المعطاه بالكتاب ، ولتمكين القارئ من استيعاب هذه المعلومات . وتستخدم هذه الأمثلة ، إذا تطلب الأمر ، خواص المبردات المعطاه بالملحق أ بنهاية الكتاب . كما راعينا وضع المعادلات والرموز باللغة الإنجليزية كما تعود مهندسونا عند دراستها في كليات الهندسة ، منعاً للبلبلة ، ولربط القارئ بالأصول الإنجليزية المتعارف عليها في جميع أنحاء العالم . أيضاً ، راعينا استخدام محاور الخرائط والأشكال بنفس اتجاهها في اللغة الإنجليزية ، مع تعريب المصطلحات الموجودة عليها ، لتبقى هذه الخرائط والأشكال بنفس شكلها المعتاد بغض النظر أن كانت الكتابة عليها باللغة العربية أم باللغة الإنجليزية .

ولقد لاحظنا خلال اهتمامنا بتعريب العلوم الهندسية في السنوات العشر الأخيرة إحجام بعض المهندسين العرب عن قراءة الكتب العربية لهذه العلوم لعدم دراية هؤلاء

المهندسين بالمصطلحات العلمية نظراً لدراستهم لهذه العلوم باللغة الإنجليزية . ولهؤلاء قمنا بإعداد قائمة بالمصطلحات العربية المستخدمة بالكتاب ، وتعريفاً لها باللغة الإنجليزية، لنمكن القارئ من ربط المصطلحات العربية بالمصطلحات الإنجليزية (انظر الملحق جـ بالكتاب) . فقط ، ننصح القارئ الذي ليس لديه دراية بالمصطلحات العربية بالصبر في قراءة الكتاب حتى يتعرف على هذه المصطلحات ، ثم سيجني إن شاء الله ثمرة جهده ويزيد معدل استيعابه لمعلومات الكتاب كلما تقدم بالقراءة .

وأخيراً لا يمكنني إنهاء هذا التقديم دون أن أتقدم بالشكر أولاً لله الذي أعانني على إنهائه ، ثم لكل من ساعدني في إتمام هذا العمل وأخص بالشكر م. ناهل السيد الذي قام دون ملل أو شكوى بصف الكتاب وتعديل أجزائه مرات ومرات ، ومهندس محمد شكري جلال الذي قام بإعداد الرسومات والأشكال بالكتاب ، وأفراد عائلتي الذين وفروا لي الوقت اللازم لإتمام العمل ، والعديد من الزملاء والأصدقاء الذين ساهموا بإبداء الرأي في بعض أجزاء الكتاب ، وللجميع خالص شكري وعرفاني .

مصطفى محمد السيد

جدة – رمضان ١٤١٣ (مارس ١٩٩٣)

١

هندسة التبريد وتطبيقاتها

١.١ التبريد والحياة المعاصرة

عرفت الحضارة الإنسانية التبريد منذ القدم ، واستفادت منه بغرض حفظ الأغذية عند توفرها لاستخدامها في أوقات الندرة ، أو لتبريد الماء . ففي حوالي ٢٥٠٠ سنة قبل الميلاد تمكن قدماء المصريين من الحصول على تأثير تبريدي بدرجات متفاوتة تصل في بعض الأحيان إلى الحصول على ثلج ، وذلك بالتبخير والتبادل الحراري بالإشعاع بين سطح الماء أو بعض الأطعمة ، والسماء أثناء الليل . ثم عرف الإنسان الأول ، أيضاً ، الفخار وصنع منه أواني عديدة يوضع بداخلها الماء فيتم تبريده بتبخير جزء منه من سطح هذه الأواني الفخارية .

أما في الأماكن التي بها ثلج في بعض فصول السنة فقد استطاع الإنسان منذ

القدم تخزين هذا الثلج في الكهوف لفترات طويلة ، واستخدامه لحفظ الأطعمة المختلفة ، كما ثبت في شمال إيران .

وبتقدم الحضارة الإنسانية ورقيها زادت الحاجة إلى التبريد ، فلزم إيجاد السبل للحصول على التبريد بكميات كبيرة وبطريقة اقتصادية ، حتي بات من المستحيل تخيل حياتنا المعاصرة دون صناعة التبريد . فمثلاً يلزم التبريد لحفظ الأغذية بكميات كبيرة لإمداد المدن الحديثة بالغذاء اللازم لسكانها حيث ينتج معظم الغذاء خارج هذه المدن ، ولحفظ هذا الغذاء بعد إنتاجه وتوزيعه عند الحاجة إليه . كما يلزم استخدام التبريد لتكييف الهواء للراحة الحرارية في المباني الكبيرة التي يُضطر إلى تشييدها في مناطق الأعمال المزدحمة في المدن ، ولا يمكن الاستفادة من هذه المباني دون تكييف الهواء بها . أيضاً ، تسببت حياتنا المعاصرة بالمدن الكبرى إلى وجود وسائل مواصلات تعمل على نقل الأعداد الهائلة من العاملين بسرعة من مكان إلى آخر ، ويلزم أيضاً ، عندئذ ، تكييف وسائل المواصلات الجماعية هذه لضمان أدائها على الوجه الأكمل .

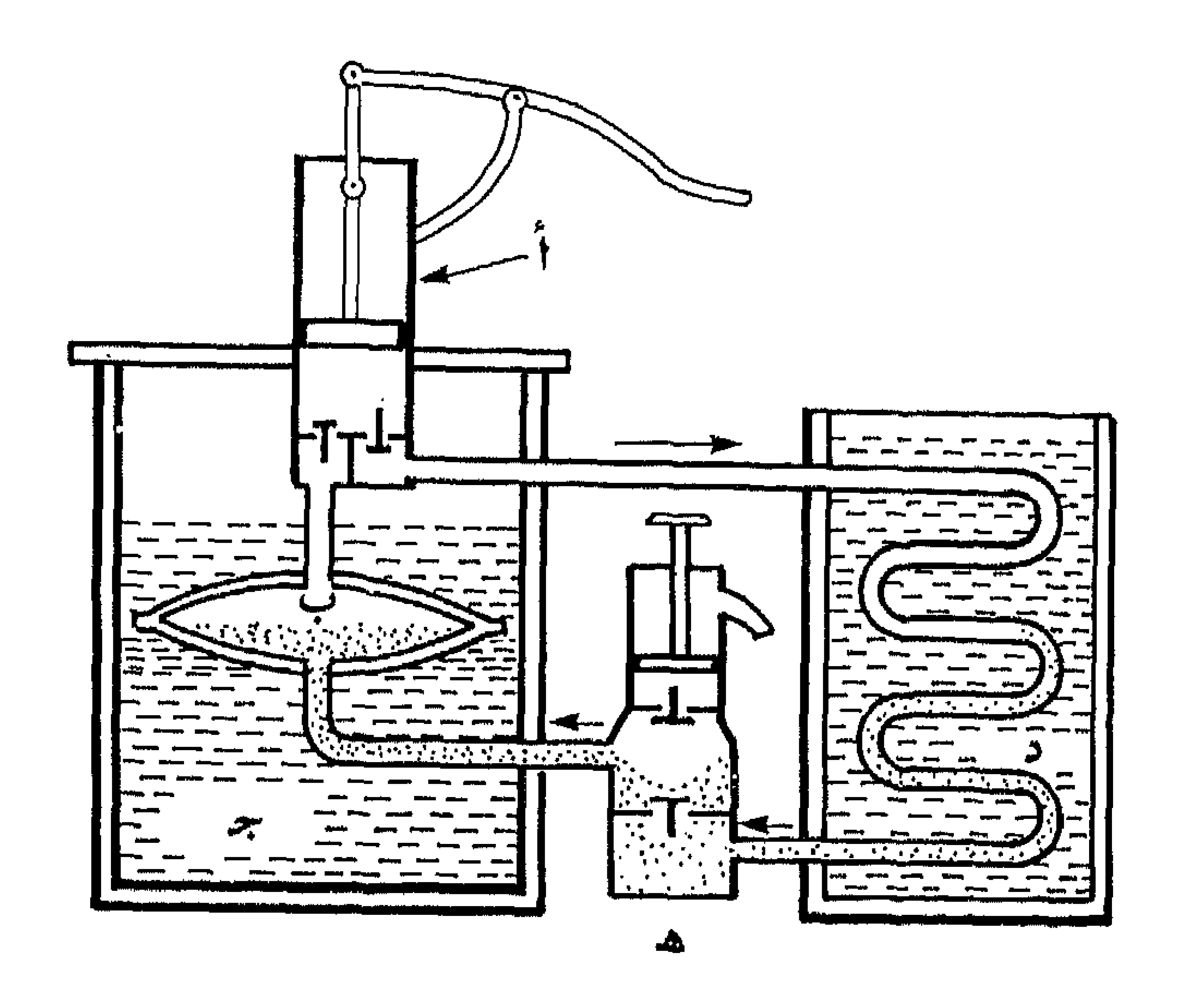
وبالتقدم الصناعي دخلت صناعة التبريد إلى العديد من الصناعات إما لتحسين الإنتاجية كما هو الحال في صناعة الغزل والنسج وصناعة الملابس ، وصناعة الطباعة والتصوير الفوتوغرافي وغيرها ، أو كضرورة لقيام بعض الصناعات - التي لم تكن لتوجد لولا وجود صناعة التبريد - مثل صناعة البلاستيك والمطاط الصناعي والدوائر المتكاملة التي تدخل في صناعة الكمبيوتر ودوائر التحكم المختلفة ، أو لإسالة الغازات المختلفة في العمليات الكيميائية الصناعية ، أو للتنظيم الأمثل بين عملية الإنتاج والتوزيع كما هو الحال في إنتاج العجائن على سبيل المثال حيث تنتج المخابز العديد من العجائن والجاتوهات والتورتات ثم يتم تجميدها مباشرة وتحفظ حتي يتم رفع درجة حرارتها مرة أخري إلى درجة الحرارة المعتادة قبل البيع بقليل حتي تكون طازجة قبل البيع مباشرة .

١.٢ نشأة هندسة التبريد وتطويرها

لا نعرف بدقة متى استطاع الإنسان توليد الثلج معملياً أو صناعياً وإن كانت الوثائق العلمية تدل على أن البروفسور كيلن (Cullen) ، أستاذ الكيمياء بجامعة ايدنبرج، هو أول من استطاع ذلك . ففي عام ١٧٥٥ تقريباً استخدم كيلن تطاير الأثير لتبريد الماء ، ثم استطاع أيضاً الإسراع بعملية تبخير الأثير وخفض درجة حرارة تبخيره ، باستخدام مضخه لخفض ضغطه ، مما ساعد على تحويل الماء المبرد إلى ثلج .

في هذه الأثناء وطوال النصف الثاني من القرن الثامن عشر ظهرت فكرة إسالة الغازات برفع ضغطها ثم تبريدها ، فمثلاً استطاع كلوت (Clouet) ومونج (Monge) إسالة ثاني أكسيد الكبريت في عام ١٧٨٠ ، واستطاع فان موريم (Van Morum) وفان تروستفجيك (Van Troastvijk) إسالة بخار الأمونيا عام ١٧٨٧ [جوسني ، ١٩٨٢] . ولقد ساعدت فكرة إسالة الغازات على ظهور فكرة التبريد بالتبخير ، ثم الانضغاط والإسالة مرة أخري (وهي فكرة دورة التبريد بانضغاط البخار المعروفة حالياً) . ويعتقد أن أوليفر إيفانز (Oliver Evans) بمدينة فلاديلفيا الأمريكية هو أول من أشار إلى هذه الفكرة في عام ١٨٠٥ ، ولا نعرف إن كان قد قام بتجربتها أم لا [تريسل وأخرون ، ١٩٦٨] .

كان يعقوب بيركنز (Jacob Perkins) أول من أعطي وصفاً مدعماً بالوثائق لدورة التبريد لانضغاط البخار باستخدام الأثير . ويبين شكل ١.١ رسماً تخطيطياً لهذه الدورة كما اقترحها بيركنز . وتعمل هذه الدورة باستخدام ضاغط يدوي لخفض الضغط في المبخر ب الذي يحوي سائل الأثير . ونظراً لانتقال الحرارة من حمام الماء جـ المحيط بالمبخر، يتطاير الأثير مسبباً تبريد الماء . ويعمل الضاغط على سحب بخار الأثير من المبخر ورفع



شكل ١.١ رسم تخطيطي لدورة تبريد بانضغاط البخار كما وصفها بيركنز [براساد ، ١٩٨٣] .

ضغطه ودفعه إلى المكثف د . في المكثف يمر بخار الأثير المرتفع الضغط داخل أنابيب محاطة بالماء فيتكثف بخار الأثير داخل هذه الأنابيب . يسري سائل الأثير بعدئذ خلال صمام تمدد هـ فينخفض الضغط إلى ضغط المبخر ب ، ثم تستمر الدورة مرة أخري . ويستخدم الجزء العلوي لصمام التمدد (أنظر الشكل) لشحن النظام مبدئياً بالأثير . ولم تثبت الوثائق قيام بيركنز بتصنيع آلة تعمل بالتصميم المعطى بشكل ١.١ ، وتجربة تشغيل هذه الفكرة عملياً .

في استراليا ، استطاع هاريسون (Harrison) في عام ١٨٥٦ تصنيع آلة لإنتاج الثلج تعمل بنفس التصميم الذي اقترحه بيركنز ولكن باستخدام أثير كبريتي بدلاً من استخدام الأثير . ومن غير المعروف إذا كان هاريسون قد علم بتصميم بيركنز أم لا . في نفس الوقت استطاع آخرون بناء آلات تبريد مماثلة ، بطريقة مستقلة ، في أجزاء أخري من العالم . ففي مدينة أوهايو الأمريكية صنع ألكسندر كاتلن توينينج (A. Catlin Twining)

آلة تبريد تنتج حوالي ٢٠٠٠ رطل من الثلج في ٢٠ ساعة تقريباً .

نظراً لتطاير الأثير في الضغط الجوي عند درجة حرارة ٣٤.٥ ^{o} م - وهي درجة حرارة مرتفعة نسبياً - لزم خفض الضغط بالمبخر للحصول على التبريد المطلوب ، مما يعرض المبخر إلى الانفجار إذا تسرب هواء إلى داخل المبخر . من هنا عمل بعض العلماء والمخترعين في أواخر القرن التاسع عشر على استعمال مواد أخري تتبخر عند درجات حرارة منخفضة نسبياً بالقرب من الضغط الجوي . ففي عام ١٨٧٠ قدم كارل فان ليند (Carl van-Linde) في ألمانيا استخدام الأمونيا بدلاً من الأثير ، حيث تتبخر الأمونيا في الضغط الجوي عند درجة حرارة قدرها -٣٣.٣ ^{o} م . منذ ذلك الحين أصبحت الأمونيا ولسنوات طويلة من الموائع المستخدمة كمبردات ، وإن كان يعيبها ارتفاع الضغط بالمكثف إلى حوالي ١٠ ضغط جوي ، مما يعني زيادة التكلفة الأولية لتصنيع المكثف . ولم يفضل البعض استخدام الأمونيا في بعض التطبيقات ، نظراً لخطورتها إذا حدث تسرب من آلة التبريد . لهذا السبب قدم ليند (Linde) بألمانيا ، ولو (Lowe) بالولايات المتحدة الأمريكية ، وويندهوزن (Windhausen) بألمانيا استخدام ثاني أكسيد الكربون . ويمتاز ثاني أكسيد الكربون بالأمان في استخدامه وإن كان أهم عيوبه ارتفاع الضغط بالمكثف إلى حوالي ٨٠ ضغط جوي .

منذ بداية القرن الحالي تطورت صناعة هندسة التبريد تطورات عديدة متلاحقة . فمثلاً قام ميدجلي (Midgley) عام ١٩٣٠ بالولايات المتحدة الأمريكية بتقديم مبرد ١٢ وهو أحد مبردات الهالوكربونات الذي عرف تجارياً منذئذ بفريون ١٢ . ومن المثير حقاً أن معظم المشتقات الكيميائية للهالوكربونات كانت معروفة منذ القرن التاسع عشر إلا أنها لم تكتشف كموائع تبريد إلا عام ١٩٣٠ . ومنذ ذلك التاريخ توالى اكتشاف مبردات أخرى من مشتقات الهالوكربونات واستخدامها في نظم التبريد المختلفة . أيضاً ، شهد عام ١٩٣٠ تقديم الضواغط المغلقة لأول مرة حيث ضُمَّ الضاغط والموتور في علبة واحدة مغلقة ، وعملت

آلات التبريد الأوتوماتية لأول مرة عام ١٩١٧ عندما صُنِّع صمام تمدد يعمل على التحكم في سريان المبرد آلياً تبعاً لحمل التبريد ، وضمت آلة التبريد أيضاً ثرموستات لتشغيل وإيقاف الضاغط تبعاً لدرجة حرارة الحمل الحراري . في نفس هذه الفترة أيضاً ، أى حوالى ١٩١٠-١٩٢٠ ، أمكن زيادة سرعة الضاغط إلى من ١٠٠إلى ٣٠٠ لفة/دقيقة ، وبُنى بنجاح أول ضاغط ثنائى المرحلة [جوسنى ١٩٨٢ ، وبراساد ١٩٨٣ ، وناجنجاست ١٩٨٨] .

لم تنته تحديات صناعة التبريد بعد . ففي يونيو من عام ١٩٧٤ أعلن بروفسور رولاند (Roland) ودكتور مولينا (Molina) بجامعة كليفورنيا أن بعض مشتقات الهالوكربونات ، وخاصة مبرد ١١ ومبرد ١٢ ، تمثل تهديداً لطبقة الأوزون المحيطة بالكرة الأرضية ، حيث تتفاعل هذه المشتقات مع الأوزون فتؤدى إلى تقليص سمكه [أندرسون ١٩٨٧] . ومن المعروف أن طبقة الأوزون هذه تحمى الكرة الأرضية من الإشعاعات فوق البنفسجية - القادمة من الشمس - والتى قد تسبب سرطان الجلد ، وقد تؤدى إلى الوفاة في بعض الأحيان . وبالرغم من أن معظم كميات الهالوكربونات المنطلقة إلى الغلاف الجوي تأتي من مصادر صناعية أخرى غير صناعة التبريد ، إلا أن هذا التحذير يخص أيضاً صناعة التبريد . ومن أمثلة الصناعات المستخدمة للهالوكربونات - خلاف صناعة التبريد - صناعة الراديو والتلفزيون ، وصناعة وسائل الاتصالات كالتليفونات ، وصناعة أجهزة ومعدات إطفاء الحريق . وتستخدم الهالوكربونات أيضاً كمساعد دفع لرش العديد من المنظفات والعطور ، كما تدخل أيضاً في رش العوازل الحرارية الرغوية . ولقد استطاعت بعض القوانين المحلية في بعض الدول - مثل الولايات المتحدة الأمريكية - الحد من استهلاك الهالوكربونات لحماية طبقة الأوزون . وفي السنوات الأخيرة تكوّن رأي عام عالمي بضرورة حماية البيئة من الآثار الجانبية للصناعات المختلفة . وكان نتيجة لذلك أن عقد في مونتريال في ١٦ سبتمبر ١٩٨٧ مؤتمر لهذا الغرض ، وأسفر هذا المؤتمر عن ما عرف فيما بعد باتفاقية مونتريال التى وقع عليها خمسون دولة من الدول الصناعية الكبرى في العالم . هذا ولقد أصبحت هذه الاتفاقية ، فيما بعد ، جزء من برنامج الأمم المتحدة للبيئة

والمعروف باسم UNEP . وتحظر الاتفاقية زيادة استهلاك العالم من الهالوكربونات ، وتحدد خفض الاستهلاك والإنتاج لمبردات ١١ و ١٢ و ١١٣ و ١١٤ و ١١٥ (وهي من الهالوكربونات) في عام ١٩٨٩ إلى مستوى عام ١٩٨٦ ، ثم الوصول بالإنتاج والاستهلاك عام ١٩٩٣ إلى ٨٠ ٪ من مستوى عام ١٩٨٦ ، ثم يتم تدريجياً خفض الإنتاج والاستهلاك لهذه الهالوكربونات لمستوى يعادل ٥٠ ٪ تقريباً من مستوى عام ١٩٨٦ [كوكس ١٩٨٧] .

وتعتبر مشكلة طبقة الأوزون أهم التحديات المعاصرة لصناعة التبريد . ولقد بدأت هذه الصناعة العملاقة في قبول التحدي وتعمل حالياً على قهر هذه المشكلة عن طريق استنباط مبردات جديدة تحل محل الهالوكربونات . وتجاهد صناعة التبريد أيضاً في تحسين كفاءة معدات التبريد وعدم السماح بفقد شحنة الهالوكربونات كلية إلى الجو المحيط، والحد ما أمكن من هذا الفقد أثناء صيانة معدات التبريد .

١.٣ التبريد لحفظ الأغذية

احتاج الإنسان منذ القدم وسائل فعالة لحفظ طعامه نظراً لعدم توفر هذا الطعام كماً ونوعاً في جميع الأوقات وجميع الأماكن . وازداد احتياج الإنسان لحفظ الأغذية تدريجياً بظهور التجمعات العمرانية التي بدأت تستورد أنواع معينة من الأغذية من المناطق المحيطة ، مما يلزم حفظ هذه الأغذية لبعض الوقت لضمان وفرتها لفترة زمنية معقولة . وبظهور المدن العمرانية الحديثة التى تضم أعداداً هائلة من السكان ، لزم وجود مخازن عملاقة لحفظ الأغذية – الواردة من أماكن إنتاج هذه الأغذية في المناطق المختلفة القريبة والبعيدة – لفترات قصيرة وطويلة ، لضمان وجود كم كاف منها لسكان هذه المدن . وكان لهذا التطور في حاجة الإنسان لحفظ طعامه ، الفضل في وجود صناعة التبريد وتطورها السريع لتواكب هذه الحاجة الملحة .

عرفت الحضارة الإنسانية عدة طرق لحفظ الأغذية منها علي سبيل المثال التجفيف: كتجفيف البلح والمشمش والعنب والنعناع وغيرها ، والتدخين : كتدخين الأسماك واللحوم، والتخليل كما هو الحال في العديد من أنواع المخللات ، والتمليح مثل حفظ الأسماك واللحوم . وكانت معظم هذه الطرق تصلح فقط لبعض أنواع الأغذية ولايمكن تعميمها . فبينما يصلح التمليح للأسماك واللحوم فإنه لا يصلح للفواكه . أيضاً تؤدى كل هذه الطرق إلى تغير شكل ومذاق الأغذية ولا تصلح لحفظها في صورتها ومذاقها الأصلي . أضف إلى هذا ، فإن حفظ الأغذية بهذه الطرق يصلح فقط لفترات زمنية محدودة . ولقد ساعد ظهور طريقة التعليب لحفظ الأغذية بفرنسا في أوائل القرن التاسع عشر على حفظ الأغذية لفترات زمنية طويلة ، إلا أن الأغذية المعلبة تعاني عامة من الطبخ الزائد لضمان تعقيمها ، أو إضافة بعض الكيماويات لها لنفس الغرض ، مما يؤدى إلى تغير شكلها ومذاقها .

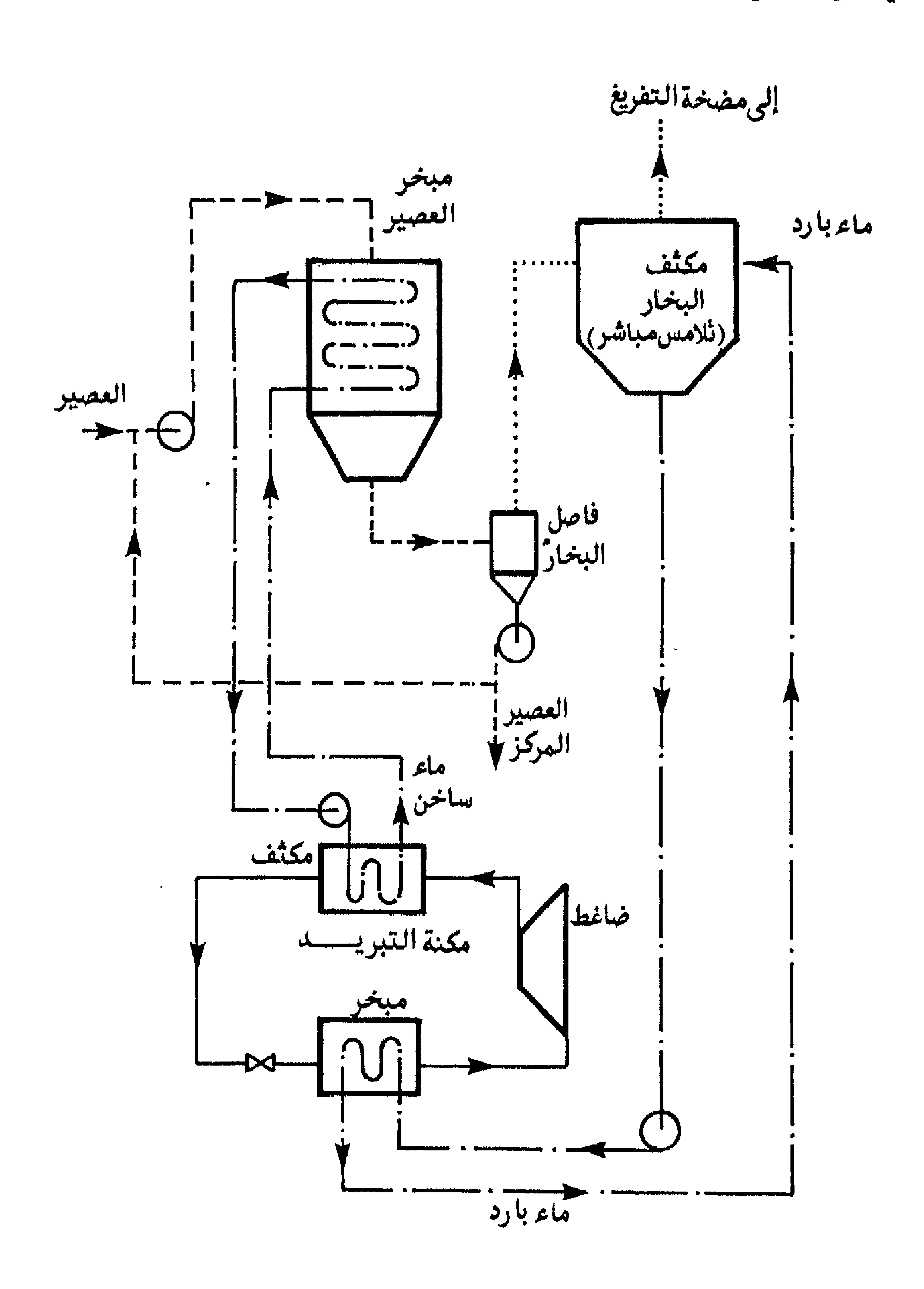
بظهور صناعة التبريد أخذ حفظ الأغذية بعداً جديداً من حيث الكم والنوع . وأصبح التبريد أهم الطرق شيوعاً حفظاً للأغذية لما له من مميزات في المحافظة على شكل ومذاق الأغذية ، بالإضافة إلى حفظها لفترات زمنية أطول من التعليب ، وإمكانية استخدام هذه الطريقة لكل أنواع الأغذية .

تدخل صناعة التبريد في حفظ الأغذية بواحدة أو أكثر من العمليات الأساسية الآتية :

أ) حفظ الأغذية في مخازن التبريد الكبيرة ، أو في ثلاجات العرض ، أو في المبردات والمجمدات التجارية والمنزلية .

ب) نقل الأغذية المبردة أو المجمدة من مكان إلى آخر مما يستلزم وجود وسائل نقل مزودة بنظم تبريد .

جـ) عمليات تصنيع الأغذية المختلفة وما تحتاجه هذه العمليات من تبريد أو تجميد يناسب كل عملية من العمليات .



شكل ١.٢ نظام تركيز عصائر باستخدام مكنة تبريد .

ويبين شكل ١.٢ واحدة من العمليات الصناعية التي تستخدم التبريد لتركيز العصائر [الأشراي ، ١٩٨٦] . في هذه العملية يتم تغذية العصير إلى مبخر العصير لتسخينه ومن ثم تبخير جزء من الماء المخلوط به . يسير خليط العصير والبخار إلى فاصل البخار حيث يفصل البخار عن العصير المركز . يعود جزء من العصير المركز إلى المبخر مرة أخرى لزيادة تركيزه . تعمل مكنة التبريد في هذا النظام بصفة مستمرة لإمداد النظام بماء ساخن وماء بارد في آن واحد . يأتي الماء الساخن من مكثف مكنة التبريد ، ويستخدم هذا الماء في مبخر العصير ، أنظر الشكل . ويأتي الماء البارد من مبخر مكنة التبريد ، ثم يستخدم في تكثيف بخار الماء بمكثف البخار .

ويمثل النظام السابق ، أنظر شكل ١.٢ ، واحدة من مئات العمليات المختلفة المستخدمة لحفظ الأغذية وتصنيعها . وهناك دائماً العديد من العمليات الصناعية الجديدة التي تُكْتَشف لحفظ الأغذية وتصنيعها .

١.٤ استخدام التبريد في تكييف الهواء

يقصد بتكييف الهواء تغيير حالة الهواء إلى الحالة المناسبة لتطبيق ما . وبناءً على هذا التعريف تقسم تطبيقات الهواء إلى قسمين رئيسيين : تكييف الهواء للراحة الحرارية للناس وتكييف الهواء للأغراض الصناعية .

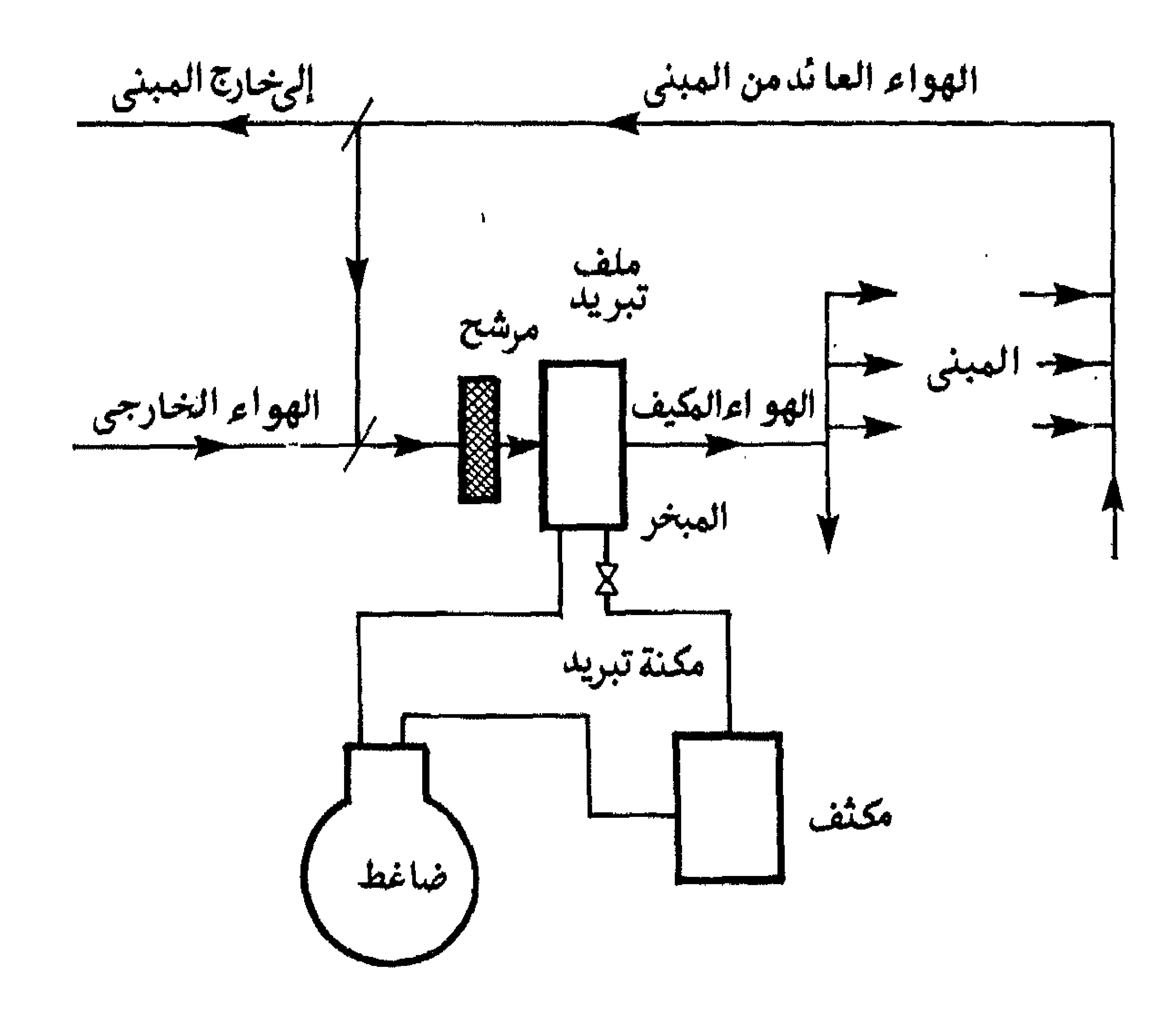
عُرِفَ تكييف الهواء للراحة الحرارية منذ قديم الزمان حيث قام الإنسان بتدفئة الهواء بالمواقد المختلفة طلباً للدفء شتاء . أما صيفاً ، فقد عرف الإنسان تكييف الهواء الذي يعتمد فقط على تحريك الهواء بالمراوح المصنوعة من الريش ، دون تغيير درجة حرارته أو نسبة رطوبته . تدريجياً عرف الإنسان تكييف الهواء بخفض درجة حرارته –

دون التحكم في نسبة رطوبته – وذلك بتمرير الهواء على أسطح مبللة بالماء فيتم تبريده بتبخير الماء . ثم عرف الإنسان تبريد الهواء بدرجة أكبر بتمريره على ثلج ، حيث كان يمكن الحصول علي هذا الثلج من قمم الجبال العالية ، وإن قصر هذا الاستخدام على الملوك والأمراء والأغنياء دون العامة .

بظهور صناعة التبريد كصناعة جديدة واعدة في بداية القرن العشرين ، بدأ الناس في استخدام هذه الصناعة لتبريد الهواء بغرض تكييفه للراحة الحرارية . ولقد تواكب هذا الاستخدام مع نمو المدن العمرانية المزدحمة التي ظهرت بها مباني عملاقة في وسط المدينة ، وأصبح من الصعب استخدام هذه المباني دون تكييف الهواء بها . تدريجياً تحول تكييف الهواء في العديد من المجتمعات من صورة من صور الرفاهية الخاصة التي لا يقدر عليها إلا علية القوم ، إلى ضرورة ماسة يطلبها الجميع . عندئذ بدأت المجتمعات تعرف أهمية تكييف الهواء لصحة الإنسان (في المجتمعات ذات الأجواء شديدة الحرارة قد تسبب درجة الحرارة المرتفعة حدوث إجهاد حراري للإنسان) وكذلك لزيادة إنتاجيته .

يوجد العديد من نظم تكييف الهواء للراحة الحرارية التي تهدف إلى تدفئة الهواء أو تبريده ، وترطيب الهواء أو تجفيفه . وتستخدم مكنة تبريد لتبريد الهواء أوتجفيفه (أي خفض رطوبته) . أيضاً تستخدم مكنة تبريد – عند عملها كمضخة حرارية – لتدفئة الهواء ، ويوضح شكل ١.٣ نظاماً لتكييف الهواء صيفاً لأحد المباني . يعود الهواء المكيف من المبنى ثم يُستبدل جزء منه بهواء جديد نقي من خارج المبنى ، ويُبَرَّد الخليط قبل إمداده إلى المبنى . لاحظ في النظام الحالي تبريد الهواء مباشرة في مبخر مكنة التبريد ، دون استخدام وسيط آخر ، خلافاً لما يحدث في بعض النظم الأخرى حيث يُبَرَّد الماء في مبخر مكنة التبريد ثم يستخدم هذا الماء لتبريد الهواء . وينتشر تكييف الهواء للراحة الحرارية في المجتمعات الحديثة ليشمل المباني السكنية والإدارية ، والمدارس والجامعات والمستشفيات والفنادق ، ووسائل المواصلات ... إلخ .

يمثل تكييف الهواء للأغراض الصناعية قطاعاً كبيراً من قطاعات صناعة التبريد. فمثلاً يفضل في المطابع تكييف الهواء لضمان جفاف أحبار الطباعة بالسرعة الكافية للمحافظة على جودة المطبوعات . أيضاً ، يلزم في مخّازن الأوراق المحافظة على الرطوبة النسبية للهواء في حدود معينة لمنع تجعد الأوراق وبالتالي خفض التالف منها . ويعمل ارتفاع رطوبة الهواء بمصانع الغزل والنسج والأقمشة على زيادة الإنتاج والمحافظة على سلامة الخيوط أثناء التصنيع . أيضاً ، تعمل الحاسبات الآلية بأفضل أحوالها في مدى معين من درجات الحرارة والرطوبة ، وتعطي مواد التصوير المختلفة أفضل النتائج إذا خزنت واستخدمت في مدى معين من درجات الحرارة والرطوبة . ويلزم التحكم في درجة الحرارة



شكل ١.٣ نظام تكييف هواء للراحة الحرارية بأحد المباني .

والرطوبة بعمليات الكيمياء الحيوية للتحكم في معدل التفاعل ، ويتطلب تصنيع الأجزاء الدقيقة المحافظة على درجة حرارة ثابتة تقريباً لمنع التمدد والانكماش الحراري للمواد . ما سبق كان بعضاً من التطبيقات العديدة ، اللانهائية العدد ، لتكييف الهواء لأغراض صناعية .

١.٥ استخدام التبريد في الصناعة

لا يمكن للعديد من الصناعات أن تقوم دون استخدام التبريد في عملياتها المختلفة. فمثلاً يستخدم التبريد لفصل المكونات المختلفة في عملية تكرير البترول ، ويستخدم التبريد أيضاً لإسالة العديد من الغازات التي تُستَعْمل في التطبيقات المختلفة . ويستخدم التبريد لتخزين الغازات في صورتها السائلة بدلاً من صورتها الغازية حيث تزيد كتلة التخزين في الحالة السائلة عدة مرات عن كتلة التخزين في الحالة الغازية (وذلك في نفس الحجم) ، ويساعد التبريد على إسالة البخر الناتج عن تسرب الحرارة إلى مستودعات تخزين السوائل . كما يستخدم التبريد أيضاً لفصل الغازات عن بعضها البعض ، كما هو الحال في فصل مكونات الهواء بالتبريد والإسالة لهذه المكونات . ويستخدم التبريد لتكثيف الأبخرة الناتجة من بعض العمليات الصناعية وفصلها عن بعضها البعض .

ومن التطبيقات الهامة الأخرى في الصناعة تجفيف الهواء بنزع رطوبته بالتبريد حيث تتطلب بعض الصناعات هواء جافاً ، كما هو الحال في بعض الصناعات الدوائية ، ويُسْتَخْدَم التبريد لضبط درجة حرارة بعض عمليات التخمر الصناعية مثل عمليات إنتاج البنسلين وإنتاج الجبن والعجائن . كما أن التبريد يستخدم في العديد من التفاعلات الكيميائية ، التي تتم في درجات حرارة منخفضة عن درجة حرارة الجو المحيط ، للتخلص من الحرارة الناتجة من التفاعل . ويستفاد من التبريد بصفة عامة لتبريد المواد

المختلفة في العديد من العمليات الصناعية الغذائية وغير الغذائية ، كما هو الحال في صناعة المواد البلاستيكية ، وتقسية المعادن ، وإنتاج الأجهزة والمعدات الدقيقة . كما يساعد التبريد ، على سبيل المثال ، في تحسين المغناطيسية لبعض المواد بتبريدها إلى درجة حرارة منخفضة لفترة زمنية معينة .

ولقد دخلت صناعة التبريد إلى العديد من المجالات الطبية . فوُجِدت بعض الجراحات التي يُفَضَّل إجراؤها باستخدام تبريد موضعي ، كما تُنتَج العديد من الأدوية باستخدام عمليات تبريد منوعة . ويستخدم التبريد أيضاً لحفظ الدم والأنسجة ، فمثلاً بتبريد الدم لدرجة ٤ °م يمكن أن يحتفظ به لمدة تصل إلى حوالي ٢١ يوماً ، وبتجميد الدم عند درجة حوالي -٢٠ °م يمكن الاحتفاظ به لمدة تصل إلى سنة . أيضاً يلزم لزراعة الأعضاء حفظها صالحة لحين الحاجة إليها ، ولا يمكن هذا إلا بتبريدها إلى درجة حرارة معينة . ويمكن الاحتفاظ بالعظام في حالة جيدة بتخزينها عند درجة حرارة حوالي -٢٠°م . كما يمكن المحافظة على بعض أنواع الفيروسات لإجراء الدراسات عليها بحفظها في زجاجات معزولة جيداً ومبردة إلى درجة حرارة بين -٢٠ °م و-٤٠ °م .

يُسْتَخْدَم التبريد أيضاً لتحسين خواص بعض المواد . فمثلاً يمكن تحسين مقاومة الصلب للتآكل ورفع صلادته بتبريده لدرجة حرارة حوالي -٩٠ °م لمدة حوالي ٣٠ دقيقة . أيضاً يُحَسِّن التبريد مرونة الحديد عند سحبه إلى أسلاك . كما يؤدي تبريد الحديد وسبائكه إلى درجات حرارة محددة لفترة معينة إلى تحسين حدة الأسلحة الحديدية وآلات القطع ، وخفض التمدد والانكماش الحراري لهذه المنتجات .

ويستخدم التبريد أيضاً لتطوير وتحسين أداء صناعة البناء ولتمكين هذه

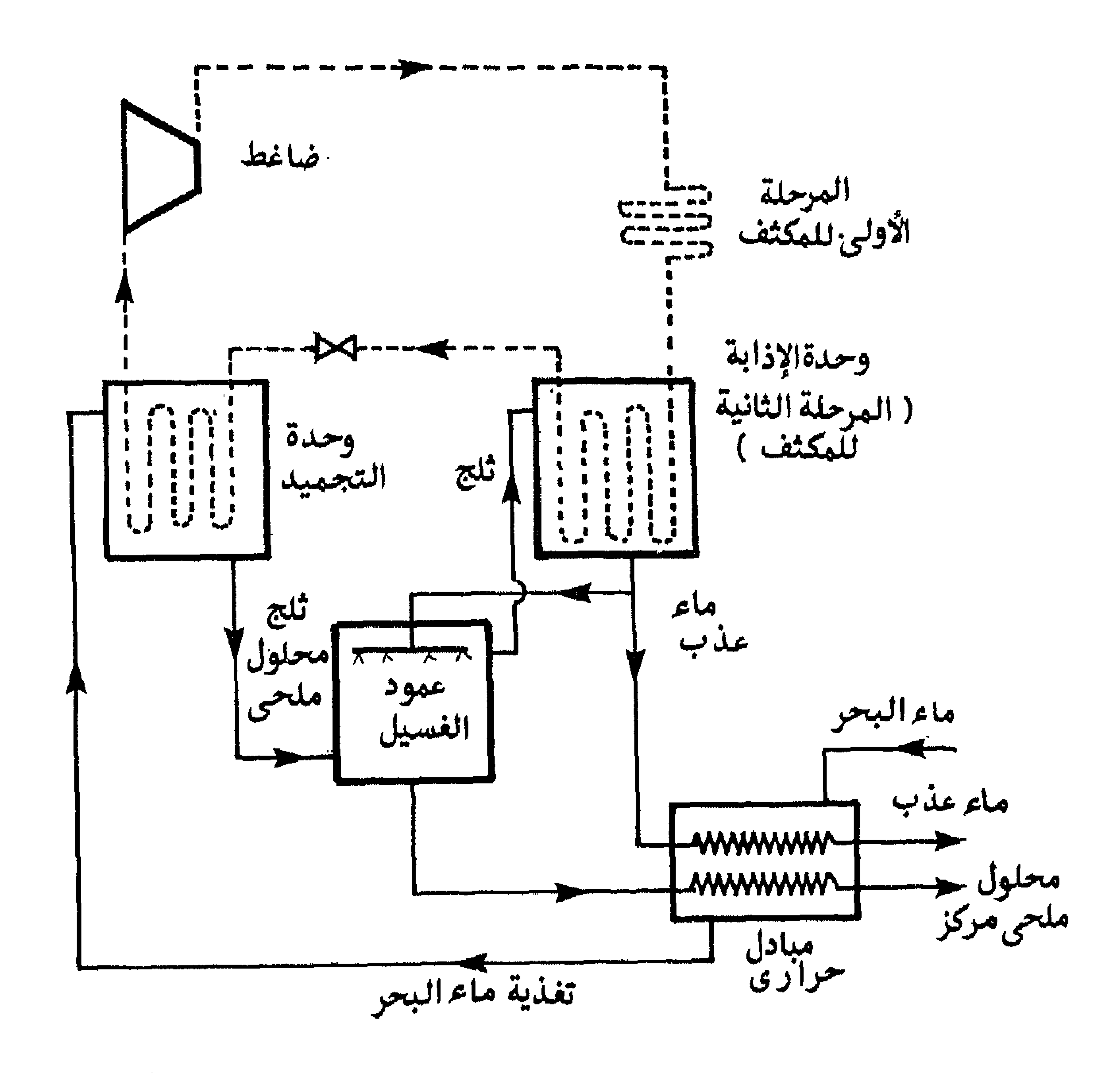
الصناعة من تنفيذ بعض المشاريع التي يصعب تنفيذها دون الاستعانة بالتبريد . فمثلاً يستخدم التبريد في بعض الحالات لتجميد التربة لتسهيل عمليات الحفر . أيضاً تتطلب بعض المشاريع ، التي تستخدم كميات كبيرة من الخرسانة ، تبريد الخرسانة لمنع تشققها عند تماسكها . فعندما تبدأ الخرسانة في التماسك - نتيجة تفاعلها كيميائياً - ينتج قدر هائل من الحرارة التي يلزم إزالتها وإلا تسببت هذه الحرارة في تمدد الخرسانة وحدوث تشققات بها . ويهدف تبريد الخرسانة قبل صبها إلى إزالة هذه الحرارة . في مثل هذه الحالة يفضل تبريد الرمل والأسمنت والزلط والحصى والماء قبل خلطها معاً ، أو دفن مواسير تحمل مياه مبردة داخل صبة الأسمنت .

١٠٦ إعذاب مياه البحر بالتجميد

تندر في بعض مناطق العالم المياه العذبة اللازمة لإقامة مجتمعات حضارية حديثة ، كشبه الجزيرة العربية والخليج العربي مثلاً . في مثل هذه المناطق ، تتوفر مياه البحر الملحة التي تتراوح ملوحتها بين ٣٠٠٠٠ إلى ٤٥٠٠٠ جزء من المليون مما يجعلها غير صالحة للشرب والزراعة والصناعة . وكان لابد من إعذاب هذه المياه بكميات هائلة للوفاء بحاجة هذه المناطق من المياه العذبة ، فظهرت عدة تقنيات مختلفة لإعذاب مياه البحر وتفوقت اقتصاديات هذه التقنيات على بعضها البعض تبعاً للكميات المطلوب إعذابها من مياه البحر . أيضاً ظهر لكل تقنية من هذه التقنيات بعض المميزات التي تجعلها تتفوق على التقنيات الأخرى في بعض الأحيان ، ولمزيد من التفاصيل حول التقنيات المختلفة لإعذاب مياه البحر يمكن الرجوع إلى [السيد ١٩٨٧، وشبيجلر ولارد ١٩٨٠] .

وتعتبر طريقة إعذاب مياه البحر بالتجميد واحدة من الطرق الواعدة في مجال إعذاب مياه البحر نظراً لخلوها من مشاكل ترسيب القشور والتآكل التي تعتبر من أهم

عيوب الطرق الأخرى لإعذاب مياه البحر ، خاصة إعذاب مياه البحر بالتبخير الومضي (تُسْتَخْدم طريقة التبخير الومضي حالياً في معظم المحطات العملاقة لإعذاب مياه البحر بالمملكة العربية السعودية ومنطقة الخليج العربي) . وهناك عدة نظم لإعذاب مياه البحر بالتجميد ، ويبين شكل ١.٤ واحداً من هذه النظم والذي يعرف بنظام التجميد غير المباشر. ويعمل هذا النظام كما يلي . يدخل ماء البحر إلى وحدة التجميد حيث يوجد ملف التبريد لمكنة التبريد . ينتج عن التبريد المستمر في وحدة التجميد تجمد الماء مكوناً بلورات من الماء العذب التي يترسب على سطحها الملح . يخرج المحلول الملحي المركز العالق



شكل ١.٤ إعذاب مياه البحر بالتجميد غير المباشر .

به بلورات ثلج من وحدة التجميد إلى عمود الغسيل حيث تُغْسَل البلورات بسريان الماء العذب في اتجاه معاكس لسريان الثلج . يخرج المحلول الملحي المركز من أسفل عمود الغسيل بينما يسري الثلج إلى أعلى العمود ليخرج – بعد غسله من الملح العالق به – من أعلى العمود . يسري الثلج بعدئذ إلى وحدة الإذابة لإذابته باستخدام الحرارة المطرودة من مكثف مكنة التبريد .

ويلاحظ هنا أن الحرارة المطرودة من المكثف تزيد عن المطلوب لإذابة الثلج . لذا يستخدم جزءً فقط من المكثف لإذابة الثلج بينما يستخدم باقي المكثف لطرد الحرارة خارج النظام . يخرج الماء العذب الناتج عن إذابة الثلج إلى خارج وحدة الإذابة ، فيستخدم جزءمنه (عادة حوالي ٧ ٪) لغسل الثلج في عمود الغسيل بينما يسري الباقي إلى الخارج . ولتحسين الأداء الحراري للنظام ، وتوفيراً للطاقة ، يُستَخْدَم مبادل حراري لتبريد ماء البحر أولياً باسترجاع البرودة من الماء العذب وسريان المحلول الملحي المركز .

١.٧ معدات التبريد

هناك عدة دورات للتبريد منها على سبيل المثال : دورة التبريد بانضغاط البخار، ودورة التبريد بالامتصاص ، ودورة التبريد الكهروحراري وغيرها . وتعتبر دورة التبريد بانضغاط البخار هي أكثر دورات التبريد شيوعاً واستخداماً في التطبيقات المختلفة . وتتكون هذه الدورة من المكونات الآتية

أ) الضاغط

ب) المكثف

جـ) المبخر

د) صمام تمدد

هـ) مواسير تصل بين المكونات المختلفة

و) أجهزة تحكم

ز) مكونات أخرى مساعدة .

الضاغط هو القلب النابض لدورة التبريد وتستعمل دورة التبريد ضواغط بقدرات تتراوح بين ٧٠ وات إلى ١٠٠٠٠ كيلووات . وتنقسم الضواغط المستعملة في صناعة التبريد إلى الأنواع الآتية : الضواغط الترددية ، والضواغط الدورانية ، والضواغط اللولبية ، وضواغط الطرد المركزي . والضواغط الترددية هي أقدم أنواع الضواغط استخداماً في صناعة التبريد ، أما الضواغط الأخرى فقد دخلت صناعة التبريد في السنوات الأخيرة . تنقسم الضواغط من جهة أخرى إلى ثلاثة أقسام رئيسية : الضواغط المفتوحة ، والضواغط المغلقة ، والضواغط نصف المغلقة . يدار الضاغط المفتوح بموتور بواسطة سير ، أو مباشرة بنفس عمود إدارة الموتور ، ويُحْفَظ كل من الضاغط والموتور في علبة مستقلة . أما الضاغط المغلق فيُحْفَظ مع موتور إدارته في علبة واحدة ، ويتم التجميع بالمصنع مباشرة ، ولايمكن فتح العلبة الحاوية لصيانة الضاغط . والضاغط نصف المغلق له نفس مميزات الضاغط المغلق ، ولكن يمكن صيانته عند الضرورة بالموقع . أيضاً ، تقسم الضواغط من حيث عدد المراحل بها إلى ضواغط أحادية المرحلة ، وضواغط متعددة المراحل يتم انضغاط المبرد بها على عدة مراحل .

تنقسم المكثفات المستخدمة في صناعة التبريد حسب طريقة طرد الحرارة منها إلى ثلاثة أنواع رئيسية هي : المكثفات المبردة بالهواء ، والمكثفات المبردة بالماء ، والمكثفات المبردة بتبخير الماء بالإضافة إلى تبريدها بالهواء أيضاً (المكثفات التبخيرية) . ويُخْتَار نوع المكثف تبعاً لمقدار الحمل الحراري المطلوب طرده من المكثف ، وتبعاً لنوع التطبيق المستخدم . ويلزم عموماً التحكم في ضغط المكثف عند التشغيل لتعمل دورة التبريد بأفضل آداء لها . أيضاً ، يجب مراعاة اتباع الصيانةالدورية للمكثفات ، وتنظيف

سطحها ، والتأكد من عدم وجود تآكل بهذه الأسطح حتى يتمكن المكثف من طرد المقدار المناسب من الحرارة حسب احتياج دورة التبريد ، وحتى لا يرتفع ضغط المكثف عن حد السماح للدورة .

تقسم مبخرات نظم التبريد ، تبعاً لطريقة تغذية المبرد إليها ، إلى أربعة أقسام هي : المبخرات جافة التمدد ، والمبخرات مغمورة الملف ، والمبخرات فائضة التغذية ، والمبخرات مغمورة الغلاف من نوع الغلاف والأنبوب . أيضاً ، تقسم المبخرات تبعاً إلى نوع الحمل المراد تبريده إلى مبردات هواء (أو غازات) ومبردات سوائل ، ويحوي كل قسم من هذه الأنواع عدة أنواع تبعاً للشكل الهندسي للمبرد . فمثلاً ، تضم مبردات السوائل الأنواع التالية : مبرد الأنبوب والغلاف ، ومبرد الأنبوب المزدوج ، ومبرد الخزان والملف ، ومبرد باديلوت . ويؤثر أداء المبخر بشكل كبير على أداء نظام التبريد حيث أن المبخر هو الجزء المسئول في الدورة عن القيام بتبريد الحمل الحراري . وتتعرض المبخرات التي تُبَرِّد الهواء لدرجة حرارة تقل عن الصفر المئوي إلى تكون صقيع (جليد) على سطحها ، مما يقلل من معدل انتقال الحرارة بين سطح المبخر والحمل الحراري وخفض معدل سريان الهواء خلال المبخر ، لذا يلزم في هذه الأحوال وجود نظام دوري لإذابة هذا الصقيع .

يضم نظام التبريد صمام تمدد بالإضافة إلى أجهزة أخرى للتحكم في أداء نظام التبريد . ويعمل صمام التمدد في دورة التبريد على خفض ضغط المبرد من الضغط العالي بالمكثف إلى الضغط الواطي بالمبخر . كما تعمل بعض أنواع هذه الصمامات على تنظيم سريان المبرد في نظام التبريد تبعاً للحمل الحراري المطلوب تبريده . أيضاً ، تعمل بعض هذه الصمامات على حماية الضاغط من دخول سائل مبرد إليه بضمان وجود عدد معين من درجات التحميص الفوقي ببخار المبرد الخارج من المبخر . ومن أهم أنواع صمامات التمدد المستخدمة في نظم التبريد : صمام التمدد الأوتوماتي ، وصمام التمدد الثرموستاتي ، والأنبوب الشعري ، وصمام التمدد الكهربائي ، بالإضافة إلى الأنواع الأخرى .

لتشغيل نظام التبريد يلزم بالطبع توصيل مكوناته المختلفة بمواسير وأنابيب لحمل المبرد من وحدة إلى أخرى ، وتعرف هذه المواسير والأنابيب بخطوط المبرد . ويتم تصميم وتركيب هذه الخطوط في النظم سابقة التجميع بالمصنع . أما النظم غير سابقة التجميع فتحتاج أن يقوم مهندس التبريد بتصميم وتركيب خطوطها . لذلك يجب على هذا المهندس اختيار خامة هذه الخطوط ومواصفاتها . ويجب عليه أيضاً أن يصمم هذه الخطوط ليكون فقد الضغط بها منخفضاً نسبياً ، توفيراً للطاقة ولتحسين أداء نظام التبريد ويجب أن تسمح خطوط المبرد بدوران زيت تزييت الضاغط مع المبرد ، وعودته مرة أخرى إلى الضاغط دون ترسبه في بعض أجزاء نظام التبريد (في حالة الهالوكربونات فقط) . أيضاً يجب أن يراعي مصمم هذه الخطوط سهولة صيانتها عند الضرورة .

يضم نظام التبريد أيضاً العديد من أجهزة التحكم التي تعمل على حماية نظام التبريد ، عند الضرورة ، من تغير ظروف التشغيل . فمثلاً هناك أجهزة تحكم لإذابة الصقيع الموجود على المبخر (إن وجد) ، وأجهزة تحكم لتشغيل سخان الزيت بالضاغط أثناء دورة التوقف بالضاغط ، وأجهزة تحكم للمحافظة على ضغط المبخر ثابتاً ، وأخرى للمحافظة على ضغط المكثف شبه ثابت ، وأجهزة تحكم لإيقاف الضاغط إذا ما قل ضغط السحب عن حد السماح أو إذا ما زاد ضغط الطرد عن حد السماح ، وغيرها من أجهزة التحكم .

هناك العديد من المعدات المساعدة – غير الأساسية – التي قد تستخدم في بعض نظم التبريد دون البعض الآخر . ومن أمثلة هذه المعدات المساعدة الآتي

أ) المُسْتَقْبِل : هو مستودع يوضع بعد الخروج من المكثف في بعض نظم التبريد لتخزين سائل المبرد . ويسحب سائل المبرد من المستقبل إلى صمام التمدد حسب حاجة حمل التبريد .

ب) المبادل الحراري : تستخدم بعض نظم التبريد مبادلاً حرارياً بين سائل المبرد الخارج من

المكثف وبخار المبرد الخارج من المبخر وذلك للحصول على تبريد تحتي لسائل المبرد مما يحسن التأثير التبريدي بالمبخر .

جـ) المجفف/المرشح : يُستَخْدَم عادة وحدة واحدة تضم مجفف ومرشح بغرض تجفيف المبرد من أي بخار ماء قد يكون عالقاً به وترشيحه من أية شوائب . ويوضع المجفف/المرشح قبل الدخول إلى صمام التمدد .

د) مجمع خط السحب : لحماية الضاغط من دخول سائل مبرد إليه ، يوضع في بعض النظم مستودع (يعرف بمجمع خط السحب) بعد الخروج من المبخر لفصل سائل المبرد عن بخاره قبل دخول الضاغط .

هـ) وحدة التبريد التحتي : وهي وحدة تُستَخْدَم في بعض النظم بغرض الحصول على تبريد تحتي ومن ثم تحسين التأثير التبريدي بالمبخر . وتوضع هذه الوحدة عادة بعد الخروج من المكثف . وهناك عدة أنواع لوحدات التبريد التحتي .

و) وحدة التبريد البيني : تستخدم بعض نظم التبريد متعددة المراحل وحدة تبريد بيني لتبريد بخار المبرد الخارج من الضاغط بمرحلة الضغط المنخفض قبل سحب هذا البخار بضاغط المرحلة التالية .

ز) فاصل الزيت : تضم نظم الأمونيا وبعض نظم الهالوكربونات معدات خاصة بفصل زيت تزييت الضاغط عن بخار المبرد . ويوضع فاصل الزيت بخط الطرد من الضاغط .

ح) مضخة سائل المبرد : تستخدم بعض النظم الكبيرة للتبريد مضخة أو مضخات للمساعدة على سريان سائل المبرد إلى المبخرات البعيدة ولتحسين أداء نظام التبريد.

ط) موزع المبرد : تستعمل نظم التبريد ذات المبخر متعدد المسرات موزع مبرد قبل الدخول إلى المبخر مباشرة لضمان عدالة توزيع سائل المبرد إلى ممرات المبخر المختلفة ، مما يساعد على أداء المبخر بكفاءة مقبولة .

وهناك العديد من المعدات الأخرى المساعدة بالإضافة إلى ماسبق . وفي الفصل التالي نعرض نظم التبريد بانضغاط البخار ، ثم تقدم الفصول الستة الباقية – أي من الفصل

الثالث إلى الفصل الثامن – المعدات الأساسية لنظم التبريد بانضغاط البخار ، وهي المبخر ، والمكثف ، والضاغط ، وصمام التمدد . ولا ندعي هنا أن الكتاب الحالي يشمل كل ما يخص هذه المعدات من التفاصيل التي قد يحتاجها القارئ ، إلا إننا حاولنا قدر جهدنا عرض ما نراه هاماً فقط ، دون إطالة ، ومع مراعاة أن يبقى حجم الكتاب معقولاً .

٣

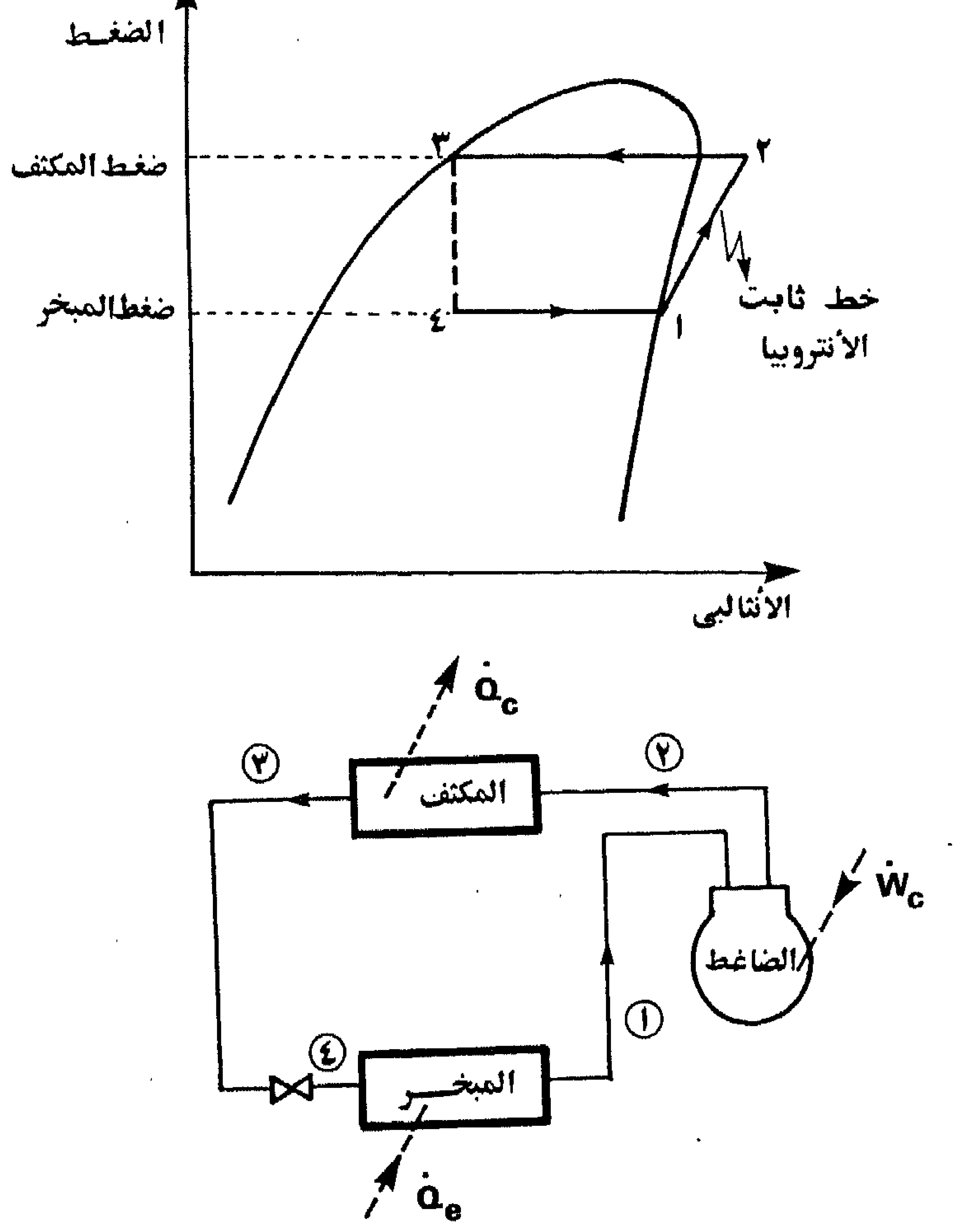
نظم التبريد بانضغاط البخار

٣.١ الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار

تتكون الدورة المثالية البسيطة للتبريد بانضغاط البخار من أربع مكونات أساسية هي المبخر والضاغط والمكثف وصمام تمدد ، كما هو مبين بشكل ٢.١ . تعمل الدورة بمائع يعرف بالمبرد . وتعمل الدورة بين ضغطين أحدهما الضغط الواطي بالمبخر والآخر الضغط العالي بالمكثف ، وعليه تكون وظيفة الضاغط هي رفع ضغط بخار المبرد الخارج من المبخر عند الضغط الواطي إلى الضغط العالي بالمكثف ، بينما يقوم صمام التمدد بالعملية العكسية أي خفض الضغط لسائل المبرد الخارج من المكثف إلى ضغط المبخر . يعطي المبخر التأثير التبريدي للدورة عن طريق تبخير سائل المبرد الداخل إلى

المبخر مما ينتج عنه سحب حرارة من الحمل الحراري ، فيتم تبريده . أما المكثف فيعمل على تكثيف بخار المبرد - ذو الضغط العالي - الخارج من الضاغط .

تتكون الدورة البسيطة المثالية للتبريد بانضغاط البخار من أربع عمليات مثالية . ويبين شكل ٢.١ تمثيل هذه العمليات على خريطة الضغط - الأنثالبي للمبرد المستخدم بالدورة . وبفرض أن النقاط ١ و ٢ و ٣ و ٤ تمثل حالات اتزان ثرموديناميكي بين المكونات المختلفة بالدورة ، فإن العمليات الأربع بالدورة تكون عندئذ كما يلي :



شكل ٢.١ الدورة المثالية البسيطة للتبريد بانضغاط البخار.

العملية ١-٢ : انضغاط رجعي بدون انتقال حرارة ، أي انضغاط ايزنتروبي أو انضغاط ثابت الأنتروبيا

العملية ٢-٣ : طرد حرارة (لتكثيف بخار المبرد) مع ثبات الضغط

العملية ٣-٤ : خنق سائل المبرد (وتعرف أيضاً هذه العملية بتمدد سائل المبرد) ، أي خفض الضغط مع ثبات الأنثالبي

العملية ٤-١ : كسب حرارة (لتبخير سائل المبرد) مع ثبات الضغط .

تقدر قدرة الضاغط تبعاً للعملية ١-٢ عالية كما يلي

$$\dot{W}_c = \dot{m}\ (h_2 - h_1) \tag{2.1}$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المبرد بالدورة ، و h هي أنثالبي المبرد عند الحالة المعنية . أيضاً يُقدّر معدل الحرارة المطرودة بالمكثف ومعدل الحرارة المكتسبة بالمبخر كما يلي ، على التوالي

$$\dot{Q}_c = \dot{m}\ (h_2 - h_3) \tag{2.2}$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}\ (h_1 - h_4) \tag{2.3}$$

ومن القانون الأول للديناميكا الحرارية يلزم تحقق الآتي

$$\dot{W}_c = \dot{Q}_c - \dot{Q}_e \tag{2.4}$$

أو ما يعرف باتزان الطاقة للدورة . ويُقَيِّم أداء الدورة بمعامل الأداء COP الذي يعرف كنسبة معدل تبريد الحمل بالمبخر إلى قدرة الضاغط ، أي أن

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} \tag{2.5}$$

وباستخدام معادلة ٢.٤ يمكن أيضاً أن يكتب معامل الأداء كما يلي

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_c - \dot{Q}_e} \qquad (2.6)$$

ويفضل عادة مقارنة معامل أداء الدورة بمعامل أداء دورة كارنوت العكسية ، وهي دورة مثالية ، تعمل عند نفس ظروف دورة التبريد بانضغاط البخار ، ولها أعلى معامل أداء يسمح به القانون الثاني للديناميكا الحرارية . ويُعَرَّف معامل أداء دورة كارنوت العكسية كما يلي

$$COP_c = \frac{T_e}{T_c - T_e} \qquad (2.7)$$

حيث T_e و T_c هي على التوالى درجات الحرارة بالمبخر والمكثف بالدرجة المطلقة . عندئذ تعرف الكفاءة النسبية لدورة التبريد بانضغاط البخار بأنها النسبة بين COP للدورة و COP_c لدورة كارنوت العكسية التي تعمل عند نفس ظروف التشغيل ، أي أن

$$\eta_r = \frac{COP}{COP_c} \qquad (2.8)$$

٢٠٣ موائع التبريد (المبردات)

تحتاج دورة التبريد بانضغاط البخار التي قدمناها في الجزء السابق إلى مائع تبريد يسري بين مكوناتها المختلفة ويكون بمثابة الدم في الكائن الحي فيقوم بالعمليات المختلفة في الدورة ، وسنشير إلى مائع التبريد هذا باسم المُبَرِدْ . ولاختيار المبرد في أحد التطبيقات يجب أن يمتاز هذا المبرد بعدة خواص منها على سبيل المثال الآتي :

أ) أن يكون للمبرد قيمة عالية من الحرارة الكامنة للتبخير حتى تكون قيمة التأثير التبريدي بالمبخر لكل وحدة كتلة من سريان المبرد ، أكبر ما يمكن .

ب) أن تكون درجة تجمد المبرد منخفضة نسبياً حتى لا يتجمد هذا المبرد عند

الخروج من صمام التمدد .

جـ) أن تكون درجة الحرارة الحرجة للمبرد عالية نسبياً حتى لا تزيد القدرة اللازمة لعملية الانضغاط بشكل ملحوظ .

د) أن يكون ضغط المبرد المناظر لدرجة حرارة تبخيره بالمبخر أعلى من الضغط الجوي لمنع تسرب الهواء المحيط إلى المبخر ، وبالتالي إلى نظام التبريد .

هـ) أن يكون ضغط المبرد المناظر لدرجة حرارة تكثيفه بالمكثف منخفضاً نسبياً حتى لا يضطر مصمم المكثف والأنابيب المتصلة به إلى اختيار مواد سميكة الجدار وبالتالي تزداد التكلفة الأولية للنظام .

و) أن يكون المبرد متزناً كيميائياً ولا يتفاعل بسهولة مع المواد المستخدمة لتصنيع نظام التبريد .

ز) أن يكون للمبرد خواص حرارية جيدة تسمح بانتقال الحرارة بمعدلات عالية بين المبرد وسطحي المبخر والمكثف .

ح) أن يكون المبرد غير سام حتى لا يتسبب في قتل أي إنسان بالقرب من النظام إذا ما حدث تسرب للمبرد من النظام .

ط) أن يكون المبرد غير قابل للاشتعال ولا يساعد على الاشتعال إذا خلط بالهواء .

ك) أن يكون المبرد غير ضار بأي صورة للإنسان (للعين ، للأنف ، للجلد، للرئة) .

ل) أن يكون المبرد رخيص التكلفة نسبياً .

م) أن يكون المبرد غير ضار بالبيئة .

ن) أن يكون المبرد سهلاً في اكتشاف تسربه .

بالطبع قد يصعب إيجاد مبرد له كل الخواص السابقة ، وإنما قد تتوفر بعض هذه الخواص في مبرد دون الآخر . وعليه يعتمد اختيار نوع المبرد بنظام التبريد على التطبيق المستخدم به التبريد . ولقد قامت الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء بتحديد حوالي أكثر من ٨٥ مبرداً تستخدم في صناعة التبريد [الأشراي ، ١٩٨٩] وتم

وضع رقم مرجعي (كودي) لكل مبرد . وأكثر المبردات شيوعاً في صناعة التبريد هي مبردات الهالوكربونات ، وهي الموائع التي يدخل في تركيبها الكيميائي ذرة أو أكثر من الكلور ، و/أو الفلورين ، و/أو البرومين . وفي هذه المبردات يُحَدَّد الرقم الكودي من ثلاثة أرقام : الرقم الأول على اليمين يمثل عدد ذرات الفلورين في المبرد ، والرقم الثاني من اليمين يزيد بواحد عن عدد ذرات الهيدروجين في المبرد ، أما الرقم الثالث من اليمين فيقل واحداً عن عدد ذرات الكربون في المبرد ، ويهمل الرقم الثالث إذا كانت قيمته صفراً . فمثلاً أحادي كلوريد فلوريد الميثان ويرمز له كيميائياً بالرمز $CHClF_2$ يكون رقمه المرجعي هو ٢٢ ، وعليه يعرف بمبرد ٢٢ ، أما ثلاثي كلوريد ثلاثي فلوريد الميثان ويرمز له كيميائياً بالرمز CCl_2FCClF_2 فيكون رقمه المرجعي هو ١١٣ ويعرف عندئذ بمبرد ١١٣ . كما تُستَخدَم في صناعة التبريد أيضاً بعض الموائع غير العضوية ، ومن أهمها الأمونيا وثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت والماء والهواء وغيرها . ويحدد الرقم المرجعي لهذه المبردات بطريقة مختلفة عن الهالوكرونات ، حيث يضاف رقم ٧٠٠ إلى الوزن الجزيئي للمبرد . فمثلاً الوزن الجزيئي للأمونيا هو ١٧ ، فيكون رقمها المرجعي هو ٧١٧ ، وتعرف الأمونيا عندئذ بمبرد ٧١٧ ، أما الماء فيعرف بمبرد ٧١٨ حيث أن وزنه الجزيئي يساوي ١٨ .

وللمفاضلة بين المبردات المختلفة يجب مقارنة خواص المبردات المختلفة مع بعضها البعض تبعاً للبنود السابقة من (أ) إلى (ن) . أيضاً يجب دراسة أداء دورة التبريد باستخدام المبردات المختلفة ومقارنة معامل أدائها ، وكذلك حجم بخار المبرد عند دخول الضاغط ، للمبردات المختلفة . فمثلاً إذا أعطى مبرد معامل أداء أعلى من مبرد آخر ، كان هذا يعني وفراً في الطاقة التي تبذل في الضاغط ، أما انخفاض حجم بخار المبرد عند دخول الضاغط فيعني صغر حجم الضاغط (إذا كان من النوع الترددي) . ويبين جدول ٢.١ مقارنة بين بعض المبردات المستخدمة في صناعة التبريد . ويتضح من الجدول أن مبرد ٢٢ له أقل درجة غليان مقارنة بالمبردات الأخرى ، بينما يعطي مبرد ١١ درجة غليان مرتفعة نسبياً مما يعني ضرورة أن يكون ضغط المبخر لمبرد ١١ أقل من الضغط الجوي ، ويؤدي إلى

جدول ٢.١ خواص بعض المبردات وأداء دورة التبريد المثالية بانضغاط البخار التي تعمل بهذه المبردات [ماكوستن وباركر ١٩٧٧ ، وستوكر وجونز ١٩٨٢] .

الخاصية	مبرد ١١	مبرد ١٢	مبرد ٢٢	مبرد ٧١٧ (الأمونيا)
درجة الغليان * ، °م	٢٤.٠٠	-٢٩.٦	-٤٠.٦	-٣٣.٢
درجة التجمد * ، °م	-١١١.٠٠	-١٥٧.٦	-١٥٩.٨	-٧٧.٦
درجة الحرارة الحرجة ، °م	١٩٨.٢	١١٢.٨	٩٦.٢	١٣٣.٢
ضغط المبخر عند -١٥°م ، كيلوبسكال	٢٠.٤	١٨٢.٧	٢٩٦.٣	٢٣٦.٥
ضغط المكثف عند ٣٠ °م ، كيلوبسكال	١٢٥.٤	٧٤٤.٦	١١٩٢.١	١١٦٦.٦
حجم البخار عند دخول الضاغط لكل ١ كيلووات تبريد ، لتر/ث	٤.٦	٠.٧٨٢	٠.٤٧٧	٠.٤٦٢
معامل أداء الدورة المثالية	٥.٠٣	٤.٧٠	٤.٦٧	٤.٧٦

* عند الضغط الجوي القياسي ، أي عند ١٠١.٣ كيلوبسكال مطلق .

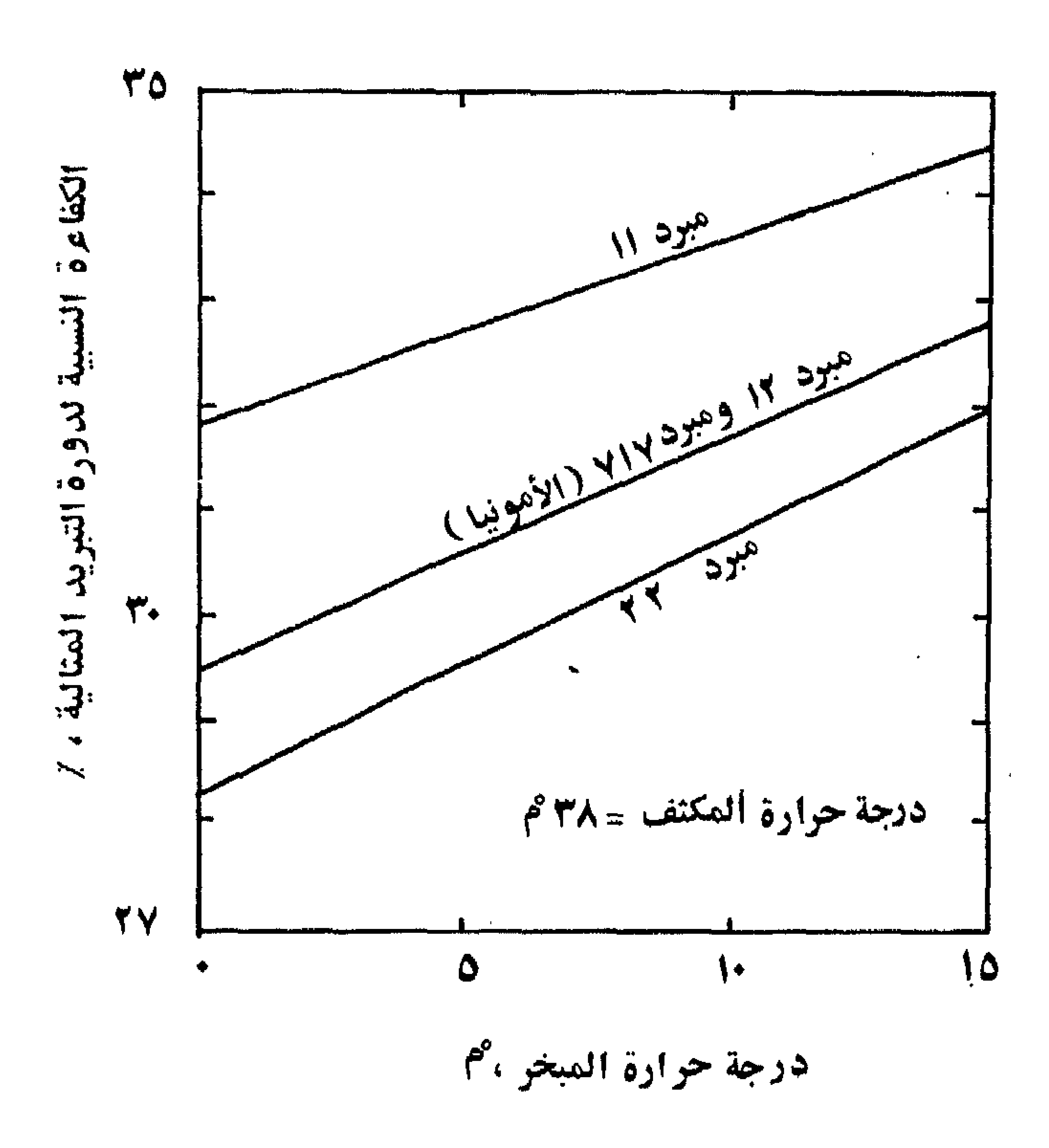
تسرب الهواء إلى المبخر . يظهر أيضاً من الجدول أن عيوب مبرد ٢٢ ومبرد ٧١٧ (الأمونيا) ارتفاع ضغط المكثف (حوالي ١١ إلى ١٢ ضغط جوي) مما يزيد من تكلفة تصنيع المكثف والأنابيب المتصلة به لتحمل مثل هذا الضغط المرتفع . كما يتضح من الجدول أن مبرد ١١ له أعلى حجم بخار عند دخول الضاغط ، لذا لا ينصح استخدام مبرد ١١ مع الضواغط الترددية ، وإن كان يستخدم عادة مع ضواغط الطرد المركزي التي تحتاج حجم بخار كبير نسبياً ، بينما يفضل استخدام مبرد ٢٢ والأمونيا مع الضواغط الترددية عامة . ويبين جدول ٢.١ أيضاً أن مبرد ١١ يعطي أكبر معامل أداء بالمقارنة بمبرد ١٢ ومبرد ٢٢ والأمونيا

التي لها جميعاً نفس معامل الأداء تقريباً .

ويبين شكل ٢.٢ تغير الكفاءة النسبية - المُعَرَّفة بمعادلة ٢.٨ - مع درجة حرارة المبخر لدورة تبريد مثالية بانضغاط البخار عند درجة مكثف قدرها ٣٨ ° م . ويقارن الشكل هذا التغير مع استخدام مبرد١١ ومبرد ١٢ ومبرد ٢٢ والأمونيا . ويتضح من الشكل تفوق مبرد ١١ ، رغم عيوبه التي ذكرت سابقاً ، على كل المبردات الأخرى بالشكل . ويتضح من الشكل أيضاً أن مبرد ٢٢ له أقل كفاءة نسبية مقارنة بالمبردات الثلاث الأخرى وإن كان يمتاز بانخفاض درجة الغليان ودرجة التجمد بالمقارنة بالمبردات الأخرى (انظر جدول ٢.١) .

وكما ذكرنا سابقاً فإن لكل مبرد استخداماته وتطبيقاته الخاصة التي يمكن فيها التجاوز عن بعض عيوبه والاستفادة من مميزاته الأخرى . فمثلاً يستخدم مبرد ١١ عادة (وبالمثل مبرد ١١٣ الذي لم يذكر في هذا الكتاب) في نظم التبريد المستخدمة لضواغط الطرد المركزي . ويستخدم مبرد ١٢ عادة في الضواغط الترددية في الثلاجات المنزلية ومكيفات السيارات والعديد من التطبيقات الأخرى . ويستخدم مبرد ٢٢ في التطبيقات ذات درجة الحرارة المنخفضة وفي نفس التطبيقات الخاصة بمبرد ١٢ ، وفي النظم الكبيرة لتكييف الهواء وفي التبريد للعديد من الصناعات . أما الأمونيا فتستخدم عادة في النظم ذات درجات الحرارة المنخفضة التي تخدم مختلف الصناعات الغذائية وغير الغذائية .

وتعطي الخواص الحرارية للمبردات عادة في جداول بدلالة درجة الحرارة أو الضغط في منطقة التشبع ، وبدلالة كليهما في منطقة التحميص (التسخين الفوقي) . أيضاً تعطي هذه الخواص في خرائط الضغط - الأنثالبي لسهولة توقيع العمليات المختلفة لدورة التبريد على هذه الخرائط . ويعطي ملحق أ هذه الخواص في جداول وخرائط الضغط-الأنثالبي لمبرد ١١ ومبرد ١٢ ومبرد ٢٢ ومبرد ٧١٧ (الأمونيا) . ولخواص المبردات



شكل ٢.٢ تغير الكفاءة النسبية لدورة التبريد المثالية بانضغاط البخار مع درجة حرارة المبخر عند درجة حرارة مكثف = ٣٨ ° م ، وباستخدام مبرد ١١ ومبرد ١٢ ومبرد ٢٢ ومبرد ٧١٧ (الأمونيا) .

الأخرى يمكن الرجوع إلى [الأشراي ١٩٨٩ ، ورازنجيفك ١٩٧٦] .

مثال ١.٢

تعمل دورة مثالية للتبريد بانضغاط البخار ، وتستخدم مبرد ٢٢ ، بين درجة حرارة مكثف قدرها ٣٠ ° م ودرجة حرارة مبخر قدرها -١٥ ° م . بفرض حالة التشبع للسائل عند الخروج من المكثف وحالة التشبع للبخار عند الخروج من المبخر ، احسب الآتي لكل ١ كيلووات تبريد في المبخر

أ) معدل سريان حجم البخار الداخل إلى الضاغط

ب) معدل طرد الحرارة من المكثف

جـ) معامل أداء الدورة

د) الكفاءة النسبية للدورة .

الحل

من ملحق أ وباستخدام شكل ٢.١ والمعطيات المعطاه عاليه ، نجد خواص مبرد ٢٢ عند النقاط المختلفة بالدورة كما يلي

الحالة	درجة الحرارة	الضغط	الأنثالبي	الحجم النوعي
	م°	كيلوبسكال	كيلوجول/كجم	م^3 / كجم
١	١٥-	٢٩٦.٣	٣٩٨.٨	٠.٠٧٧٤
٢	٥٢	١١٩٢.١	٤٣٣.٥	
٣	٣٠	١١٩٢.١	٢٣٦.٤	
٤	١٥-	٢٩٦.٣	٢٣٦.٤	

حيث استخدمت الجداول لتحديد جميع الخواص ما عدا الأنثالبي لنقطة ٢ التي تم الحصول عليها من خريطة الضغط -الأنثالبي لمبرد ٢٢ .

أ) يحسب معدل سريان كتلة المبرد في الدورة من معادلة ٢.٣ كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{398.8 - 236.4} = 0.00616 \quad \text{kg/s}$$

وعليه يحسب معدل سريان حجم البخار عند دخول الضاغط كما يلي

$$\dot{V} = \dot{m} \times v_1 = 0.00616 \times 0.0774 = 4.77 \times 10^{-4} \ \text{m}^3/\text{s}$$

وهي نفس القيمة المعطاه بجدول ٢.١ .

ب) يحسب معدل الحرارة المطرودة من المكثف كما يلي

$$Q_c = 0.00616 \times (433.5 - 236.4) = 1.214 \text{ kW}$$

جـ) تحسب القدرة اللازمة لعملية الانضغاط كما يلي

$$\dot{W}_c = 0.00616\ (433.5 - 398.8) = 0.214 \text{ kW}$$

ويقدر معامل أداء الدورة عندئذ كما يلي

$$COP = \frac{1}{0.214} = 4.67$$

وهي نفس القيمة المعطاه بجدول ٢.١ .

د) تحسب الكفاءة النسبية للدورة من معادلة ٢.٨ كما يلي

$$\eta_r = 4.67 \times \frac{(30 + 15)}{(273 - 15)} = 0.815$$

٢.٣ اختبار تسرب المبرد وشحن نظم التبريد بالمبرد

٢.٣.١ اختبار تسرب المبرد

يلزم قبل شحن نظام التبريد بالمبرد التأكد من أن يكون النظام محكم الإغلاق بحيث لا يتسرب المبرد إلى الجو المحيط . لذا تقوم مصانع نظم ووحدات التبريد بالتأكد من عدم تسرب المبرد من هذه الوحدات قبل عملية الشحن . وهناك عدة طرق لذلك ، منها الطرق الآتية :

أ) طريقة ضغط أو تفريغ نظام التبريد

في هذه الطريقة يتم ضغط نظام التبريد بالهواء أو النتروجين أو ثاني أكسيد

الكربون ، أو تفريغ النظام من الهواء وتركه فترة زمنية ، مع ملاحظة تغير الضغط بالنظام مع الزمن . ويدل معدل تغير الضغط مع الزمن على معدل التسرب الموجود بالنظام . وتفيد هذه الطريقة في اختبار إحكام إغلاق النظام دون تحديد موقع التسرب به ، إذا وجد .

ب) طريقة الغمر بالماء

في هذه الطريقة يتم ضغط نظام التبريد أيضاً بالهواء أو النتروجين أو ثاني أكسيد الكربون ثم يغمر النظام كلية بالماء في حوض جيد الإضاءة ويلاحظ تصاعد أية فقاعات للغاز في حوض الماء . ويمكن في هذه الطريقة تحديد موقع التسرب بدقة خلافاً للطريقة السابقة ، إلا أن من عيوبها أنها لا يمكنها الكشف عن المعدلات الصغيرة جداً من التسرب . وفي بعض الأحيان يمكن الاستعاضة عن الغمر الكلي بالماء بوضع محلول من الماء وبعض المنظفات الرغوية مثل الصابون فوق مكان الشك في التسرب ، عندئذ تظهر فقاعات الغاز واضحة في المحلول . ويعيب هذه الطريقة أيضاً عدم القدرة على كشف المعدلات الصغيرة جداً من التسرب ، وصعوبة اختبار جميع أجزاء النظام بهذه الطريقة .

جـ) طريقة شعلة الهاليد

تستخدم شعلة الهاليد لفحص تسرب مبردات الهالوكربونات فقط ، دون المبردات الأخرى . ويلزم عند استخدام هذه الطريقة شحن النظام بالمبرد . والفكرة الأساسية لطريقة شعلة الهاليد كما يلي . يستخدم أنبوب لسحب الهواء ثم تمريره فوق عنصر نحاسي يسخن بلهب الكحول الميثيلي أو البروبان . عند احتمال وجود تسرب في المبرد الموجود بالنظام ، يوضع أنبوب سحب الهواء بالقرب من المكان المتوقع وجود التسرب به ، فيمر الهواء المخلوط بالمبرد المتسرب فوق السطح النحاسي الساخن مما يعمل على تغيير لون اللهب إلى الأزرق / الأخضر ، ويميل لون اللهب إلى الإخضرار كلما زاد مقدار التسرب . وتمتاز طريقة شعلة الهاليد بدقتها في اختبار التسرب وحساسيتها ، حيث تصل هذه الحساسية

إلى حوالي ٢٨ جم تسرب من الهالوكربونات لكل سنة [الأشراي ١٩٨٨] . ويعيب هذه الطريقة فقدانها لحساسيتها كلما زاد تلوث الهواء الموجود بمكان الاختبار بنسبة كبيرة من الهالوكربونات . ولضمان جودة أداء اختبار شعلة الهاليد يجب أن يتم الاختبار في مكان جيد التهوية لضمان عدم تراكم المبرد المتسرب من نظام التبريد ، وزيادة نسبته في الهواء المحيط .

د) طريقة كاشف التسرب الإلكتروني

يستخدم كاشف التسرب الإلكتروني أيضاً للكشف عن تسرب الهالوكربونات فقط. ويعمل هذا الكاشف بتمرير عينه من الهواء المخلوط بالمبرد المتسرب من نظام التبريد خلال مجس الكاشف ، الذي يعمل على سحب هذا الهواء ثم تمريره فوق حاس إلكتروني يتغير أحد خواصه بتغير نسبة الهالوكربونات المخلوطة بالهواءالمار فوقه . ويمتاز كاشف التسرب الإلكتروني بحساسيته المفرطة لتسرب الهالوكربونات ، وتصل هذه الحساسية إلى أقل من ٢٨ جم من الهالوكربونات لكل ١٠٠سنة . إلا أنه لا يُفَضّل عادة استخدام كاشفات بمثل هذه الحساسية حيث إنها تعطل إذا تعرضت لهواء يحوي قدراً كبيراً من الهالوكربونات ، لذلك يُفضل خفض حساسية الكاشف إلى حولي ٢٨ جم من المبرد لكل ١٠ سنوات فقط لتحسين أدائه .

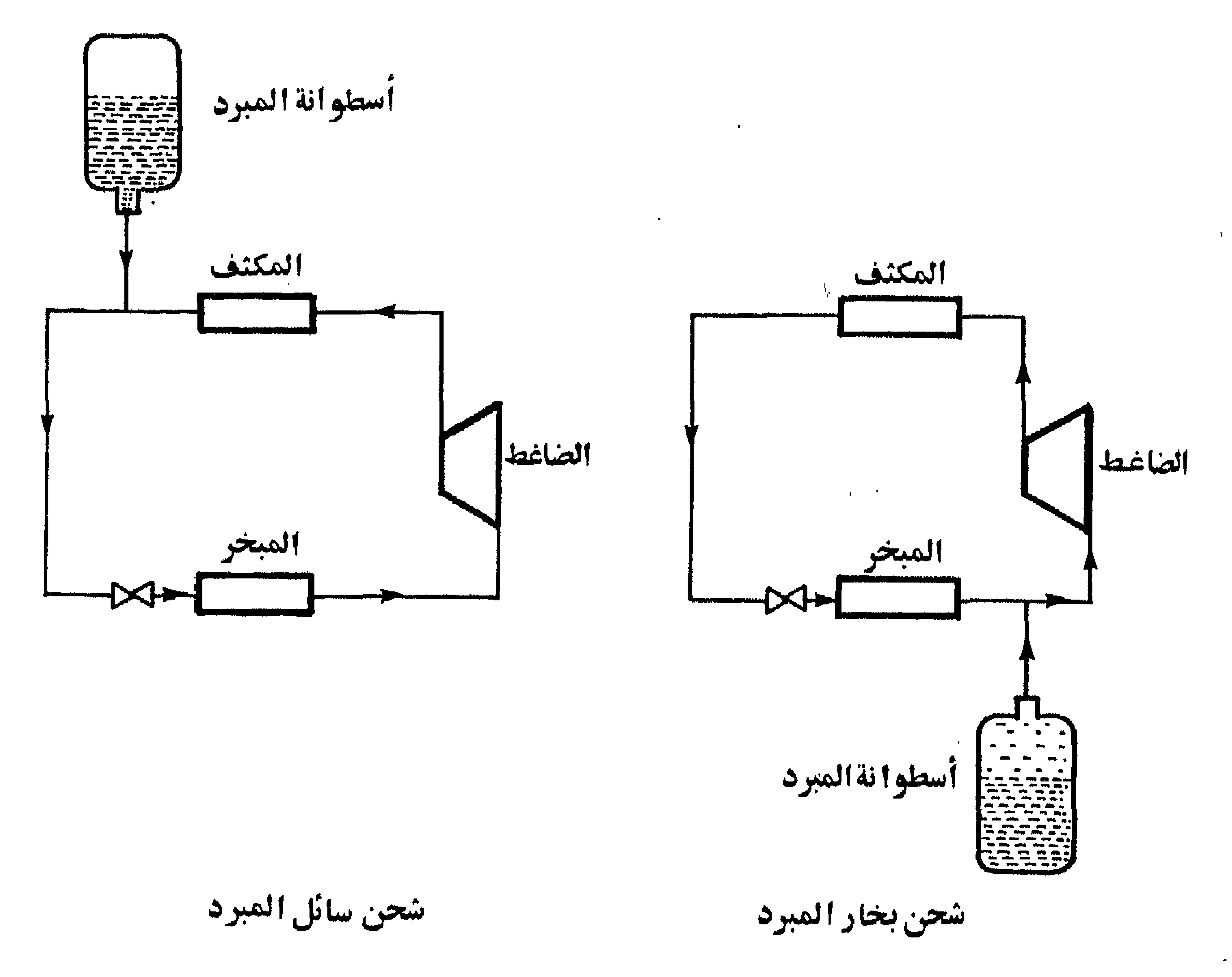
هـ) طرق كشف التسرب للأمونيا

تستخدم أيضاً طريقة ضغط أوتفريغ نظام التبريد ، وكذلك طريقة الغمر بالماء ، للكشف عن مدى إحكام نظام التبريد قبل شحنه بالأمونيا . أما بعد شحن النظام بالأمونيا فيمكن الكشف عن تسرب الأمونيا بإشعال شمعة من الكبريت بالقرب من المكان المتوقع وجود تسرب به ، فإذا كان هناك تسرب ظهرت سحابة بيضاء من سلفات الأمونيا .أيضاً ، إذا وضع محلول من حامض الهيدروليك بالقرب من موقع يتسرب منه الأمونيا ، ظهر دخان غاز كلوريد الأمونيا الأبيض .

٢.٣.٢ شحن نظم التبريد بالمبرد

بعد إجراء اختبار التسرب لنظام التبريد ، يلزم تفريغ النظام كلية (إلى أقل من ١مم زئبق) قبل شحنه بالمبرد . وتهدف عملية التفريغ إلى سحب بخار الماء والهواء والغازات الأخرى التي قد توجد داخل النظام . ويؤدي وجود بخار الماء داخل النظام إلى تجمده عند درجات الحرارة المنخفضة (أقل من صفر °م) مما قد يسبب خللاً في أداء صمام التمدد . أيضاً يختلط بخار الماء مع بعض أنواع المبردات مكوناً أحماضاً تعمل على تآكل بعض مكونات نظام التبريد . أما الغازات الأخرى غير القابلة للتكثف ، فتعمل على التجمع في المكثف مؤدية إلى رفع ضغطه (أي زيادة قدرة الضاغط) ، وزيادة المقاومة الحرارية لسطحه . لذا يلزم التفريغ الكامل لنظام التبريد قبل شحنه بالمبرد . وقد يفضل في بعض الأحيان تفريغ النظام إلى ١مم زئبق ثم شحنه بالمبرد إلى ضغط جوي ، ثم تفريغه مرة أخرى إلى أقل من ١مم زئبق ، لضمان التخلص من بخار الماء والغازات غير القابلة للتكثف [هويتمان وجونسون ١٩٩١] .

وتشحن نظم التبريد إما ببخار المبرد أو بسائل المبرد . في الحالة الأولى (وهي الحالة الشائعة في النظم الصغيرة) يشحن بخار المبرد إلى خط السحب أو خط الطرد عند إيقاف الضاغط ، أو إلى خط السحب فقط عند عمل الضاغط (نظراً لارتفاع ضغط الطرد عندئذ عن الضغط داخل أسطوانة المبرد) . ويوضح شكل ٢.٣ شحن نظام تبريد بهذه الطريقة . ويلاحظ عندئذ انخفاض درجة حرارة سائل المبرد بأسطوانة المبرد باستمرار عملية الشحن نظراً لتبخير السائل داخل الأسطوانة . وينتج عن هذا التبريد المستمر انخفاض الضغط داخل الأسطوانة إذا سُحِب قدر كبير من بخار المبرد ، فإذا انخفض هذا الضغط إلى أقل من ضغط المبخر ، توقفت عملية الشحن . لذا يجب وضع أسطوانة المبرد في مثل هذه الحالات في حمام من الماء الدافيء درجة حرارته حوالي من ٣٠ إلى ٤٠ °م ، لضمان استمرارية عملية الشحن .



شكل ٢.٣ شحن نظام التبريد ببخار أو سائل المبرد .

ويمكن أيضاً شحن المبرد في الحالة السائلة إلى خط السائل بنظام التبريد ، كما هو موضح بشكل ٢,٣ . وتستخدم هذه الطريقة فقط إذا كانت شحنة المبرد كبيرة نسبياً، وإن كانت غير مفضلة في معظم الأحوال نظراً لما قد تسببه من تلف بالضاغط إذا لم تؤخذ الاحتياطات الكافية لمنع سريان سائل المبرد إلى الضاغط . وتمتاز هذه الطريقة للشحن بسرعتها بالمقارنة بشحن بخار المبرد ، وعدم تغير الضغط في أسطوانة المبرد أثناء عملية الشحن [هويتمان وجونسون ١٩٩١] .

يتأثر أداء نظام التبريد إلى حد كبير بمقدار شحنة المبرد به . لذا تعتبر قيمة

شحنة المبرد الموجودة بنظام التبريد إحدى مواصفاته . فزيادة شحنة المبرد بنظام التبريد تؤدي إلى ارتفاع كل من ضغط المبخر وضغط المكثف عن قيمتي التصميم لهما . كما تعمل زيادة شحنة المبرد بنظام التبريد على زيادة التأثير التبريدي بالمبخر ، وإن كان هذا بالطبع على حساب زيادة قدرة الضاغط . كما قد تؤدي زيادة شحنة المبرد بنظام التبريد إلى احتمال دخول سائل المبرد إلى الضاغط ، مسبباً تلفه . أما نقصان شحنة المبرد بنظام التبريد عن القيمة الموصّى بها لهذه النظم ، فيعمل على خفض كل من التأثير التبريدي بالمبخر وكذلك قدرة الضاغط . كما تسبب نقصان شحنة المبرد بنظام التبريد على تشغيل الضاغط لفترات طويلة دون توقف ، مما يؤدي إلى قصر عمره ، وإلى التسخين الزائد به مما قد يتلفه . كذلك يؤدي نقصان شحنة المبرد بنظام التبريد إلى خفض ضغطي المبخر والمكثف (وتقل بالطبع درجة حرارة المكثف) ، وإلى تقليل الحرارة المطرودة من المكثف [لانجلي ١٩٨٦] .

ويُحَدَّد مقدار الشحنة المطلوب إضافتها إلى نظام التبريد إما بالوزن ، وفي هذه الحالة يلزم تفريغ نظام التبريد كلية ، أو بمراقبة ضغطي المبخر والمكثف وإيقاف عملية الشحن متى كان هذان الضغطان يماثلان قيمتي التصميم لهما .

بتقادم نظام التبريد قد يتسرب بعض المبرد إلى الجو المحيط . عندئذ يلزم إجراء اختبارات التسرب لتحديد موقعه ، ثم تفريغ نظام التبريد من شحنته وإصلاح موقع التسرب ، ثم تفريغ النظام كلية كما وضحنا سابقاً قبل إعادة عملية الشحن . ويلزم التنويه هنا إلى أن أجهزة اختبار التسرب مثل شعلة الهاليد وكاشف التسرب الإلكتروني تحتاج إلى معايرة دورية لضمان ثبات دقتها واعتماديتها لاختبارات التسرب .

٢.٤ تأثير درجتي حرارة المكثف والمبخر على أداء الدورة المثالية

تؤثر درجتا حرارة المكثف والمبخر إلى حد كبير في أداء الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار . وتتغير هاتان الدرجتان تبعاً للظروف الخارجية والداخلية لدورة التبريد . فتتغير درجة حرارة المكثف تبعاً لدرجة حرارة الهواء المحيط / الماء المستخدم في تبريد المكثف ، وتتغير درجة حرارة المبخر تبعاً لتغير درجة حرارة الحمل الحراري للمبخر.

من شكل ٢.١ يقدر التأثير التبريدي لوحدة كتلة المبرد بالمبخر كما يلي

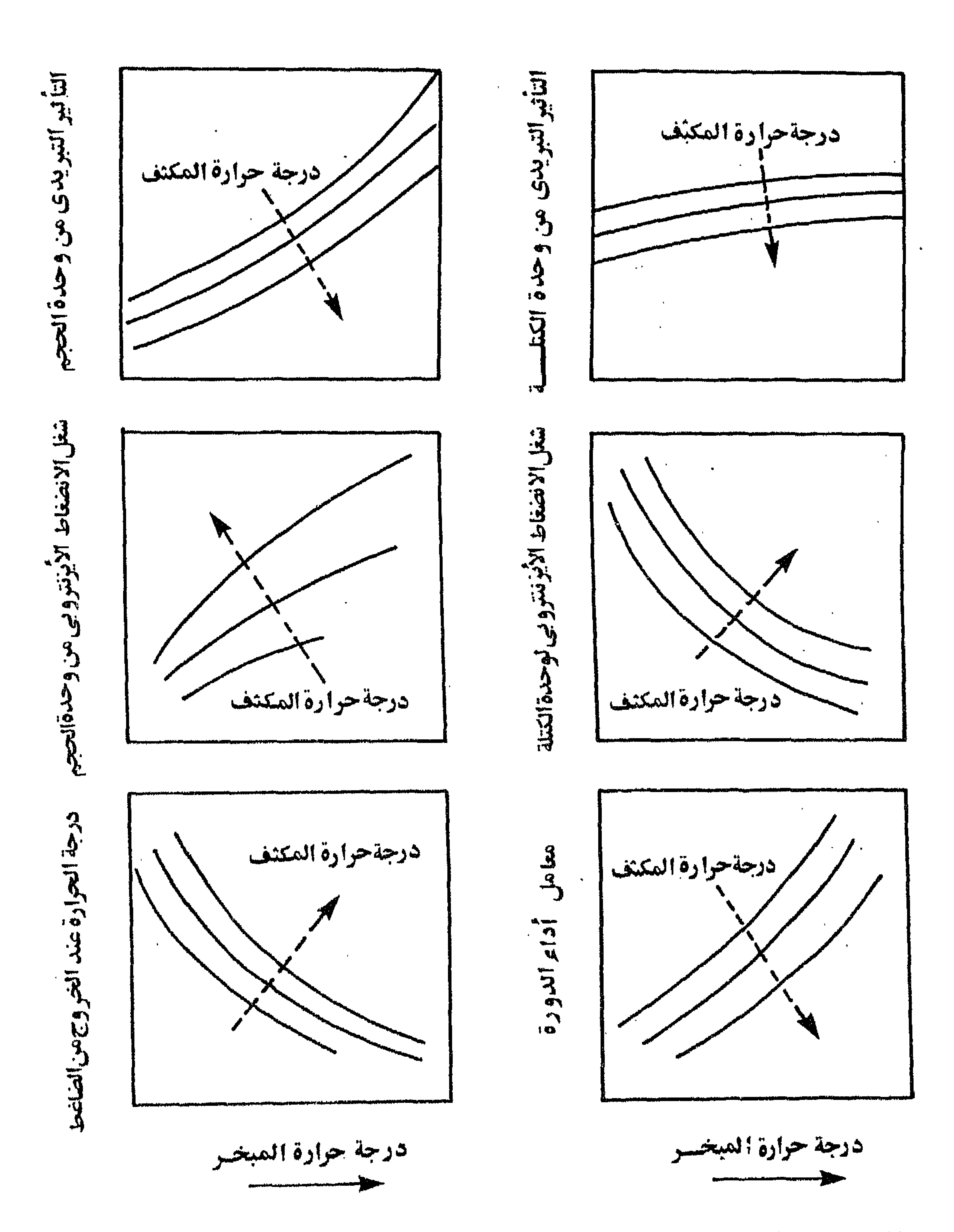
$$R.E. = h_1 - h_3 \tag{2.9}$$

ومن خرائط الضغط – الأنثالبي للمبردات يتضح زيادة قيمة التأثير التبريدي لوحدة الكتلة بزيادة درجة حرارة المبخر (نظراً لزيادة قيمة h_1) و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف (نظراً لانخفاض قيمة h_3) ، انظر شكل ٢.٤ .

ويهتم مهندس التبريد عادة بحساب قيمة التأثير التبريدي لوحدة الحجوم عند دخول الضاغط حيث يعتمد حجم الضاغط على حجم بخار المبرد الداخل إليه . عندئذ يقدر التأثير التبريدي لوحدة الحجوم كما يلي

$$(R.E.)_v = (h_1 - h_3) / v_1 \tag{2.10}$$

حيث v_1 هي الحجم النوعي عند دخول الضاغط . وبحساب قيمة $(R.E.)_v$ من العلاقة السابقة لمبردات مختلفة وجد أيضاً زيادة هذه القيمة بزيادة درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف ، انظر شكل ٢.٤ ، إلا أن الزيادة مع ارتفاع درجة حرارة المبخر تكون كبيرة نسبياً نتيجة صغر قيمة v_1 كلما ارتفعت درجة حرارة المبخر .



شكل ٤ . ٢ تغير أداء دورة التبريد المثالية مع تغير درجة حرارة المكثف والمبخر بالدورة .

يعتبر شغل الانضغاط الأيزنتروبي عاملاً آخر من العوامل التي تؤخذ في الاعتبار عند دراسة الدورة المثالية ، حيث يمثل هذا الشغل تكلفة التشغيل . ويقدر شغل الانضغاط الأيزنتروبي لكل وحدة كتلة من المبرد ، ولكل وحدة حجوم عند دخول الضاغط ، على التوالي ، كما يلي

$$W = h_2 - h_3 \tag{2.11A}$$

$$W_v = (h_2 - h_3) / v_1 \tag{2.11B}$$

ويبين شكل ٢.٤ انخفاض قيمة W بزيادة درجة حرارة المبخر و/ أو انخفاض درجة حرارة المكثف . ويبين الشكل أيضاً أن W_v تقل بانخفاض درجة حرارة المكثف وتزيد بزيادة درجة حرارة المبخر (التي تسبب صغر الحجم النوعي v_1) .

يمثل معامل أداء دورة التبريد ، المعرف بالمعادلة ٢.٥ ، مقدار التبريد الذي تعطيه الدورة لكل وحدة من شغل الانضغاط . ويبين شكل ٢.٤ تغير معامل أداء الدورة مع تغير درجتي حرارة المبخر والمكثف ، وكما هو مبين بالشكل يتحسن معامل الأداء بزيادة درجة حرارة المبخر و/ أو انخفاض درجة حرارة المكثف .

أيضاً يهتم مهندسو التبريد بدرجة حرارة الخروج من الضاغط ، حيث تمثل هذه الدرجة أعلى درجة حرارة بالدورة . وتعمل هذه الدرجة إذا زادت عن حد معين على تحلل زيت التزييت بالضاغط . ويبين شكل ٢.٤ انخفاض هذه الدرجة بارتفاع درجة حرارة المبخر و/ أو انخفاض درجة حرارة المكثف . ويعني هذا ارتفاع درجة الحرارة عند خروج الضاغط بشكل كبير إذا انخفضت درجة حرارة المبخر . لذا يلزم في تطبيقات التبريد التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة نسبياً ، استخدام أكثر من مرحلة واحدة بالضاغط ، مع تبريد البخار بين هذه المراحل ، للحد من ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من المرحلة العليا بالضاغط .

مما سبق يتبين تحسن أداء دورة التبريد عامة بارتفاع درجة حرارة المبخر و/ أو انخفاض درجة حرارة المكثف . لذا يجب على مهندسي التبريد تصميم نظام التبريد عند أعلى درجة حرارة ممكنة بالمبخر تبعاً للتطبيق المستخدم . كذلك ، يجب العمل دائماً على خفض درجة حرارة المكثف ، ما أمكن ، للحصول على أفضل أداء لدورة التبريد .

٣.٥ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار

تحيد الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار عن الدورة المثالية لعدة أسباب منها الآتي :

أ) انتقال الحرارة إلى المبرد في المواسير الواصلة بين المكونات المختلفة ، بينما يفترض في الدورة المثالية استخدام عازل حراري مثالي لهذه الأنابيب .

ب) فقد الضغط خلال سريان المبرد في الأنابيب الواصلة بين المكونات المختلفة ، وخلال السريان داخل المكونات المختلفة للدورة .

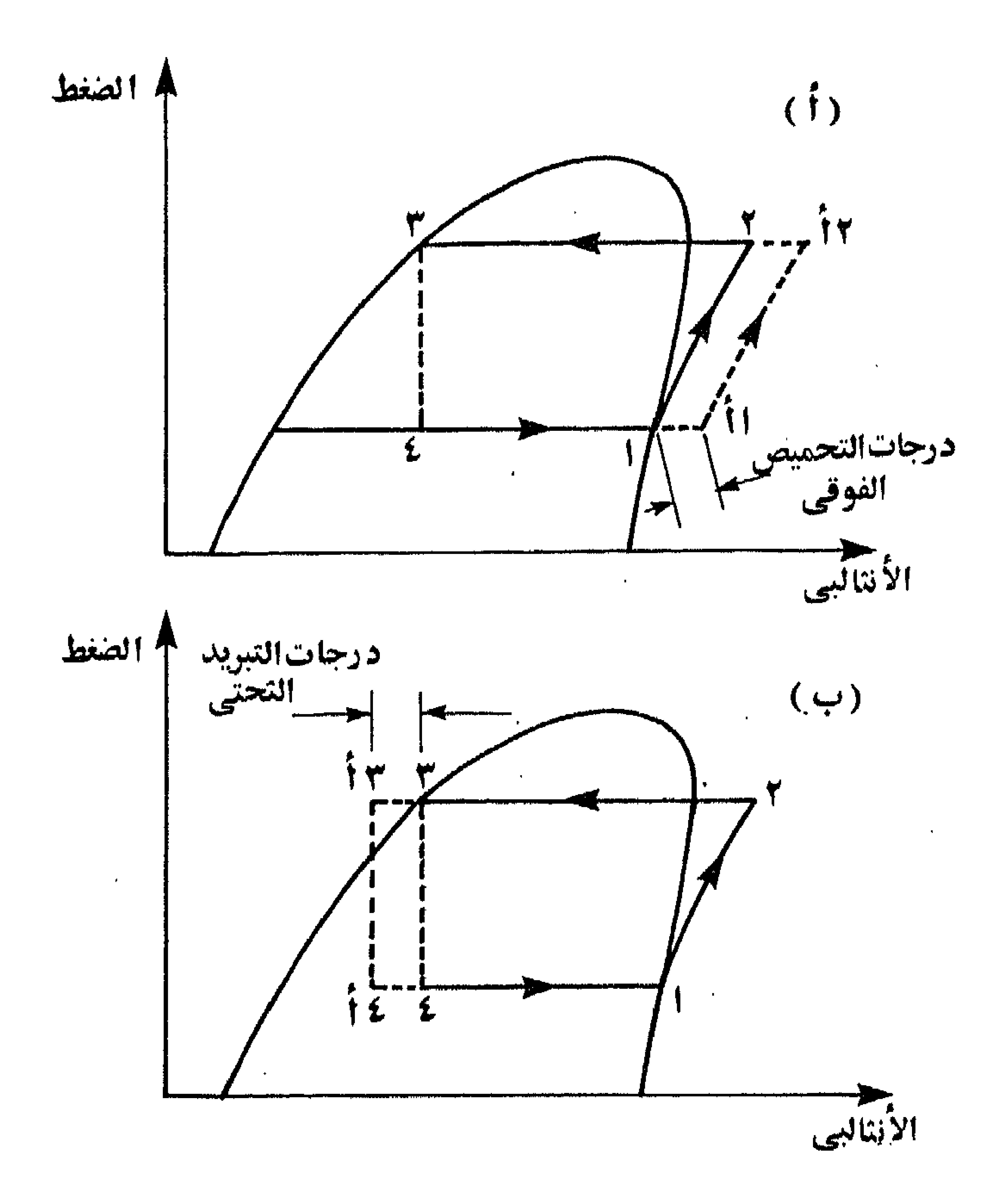
جـ) حيود عملية الانضغاط بالضاغط عن عملية الانضغاط المثالية .

وفي الأجزاء التالية نقدم حيود الدورة المثالية نتيجة كل سبب من الأسباب السابقة على حدى ، ثم نتيجة الأسباب الثلاثة مجتمعة معاً .

٣.٥.١ انتقال الحرارة بين الجو المحيط وخطوط المبرد

يخرج بخار المبرد من المبخر عند درجة حرارة أقل من الجو المحيط مما يؤدي إلى انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى بخار المبرد في خط السحب . وبفرض خروج بخار المبرد في حالة التشبع ، فإن انتقال الحرارة إلى البخار يعمل على رفع درجة حرارته كما هو مبين بشكل ٥ . ٢ (الحالة أ) . ويؤدي تسخين البخار قبل دخول الضاغط إلى العيوب الآتية :

أ) زيادة حجم البخار المسحوب بالضاغط مما يعني انخفاض معدل سريان كتلة المبرد التي يناولها الضاغط ، أي انخفاض قيمة m .



شكل ٢.٥ مقارنة الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار بالدورة المثالية : (أ) تاثير التحميص الفوقي للبخار قبل دخول الضاغط ، (ب) تاثير التبريد التحتي للسائل قبل دخول صمام التمدد .

ب) زيادة قيمة شغل الانضغاط بالضاغط .

جـ) ارتفاع درجة حرارة البخار الخارج من الضاغط (انظر الحالة أ بشكل ٢.٥) مماقد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المحمول مع بخار المبرد الخارج من الضاغط .

د) انخفاض سعة التبريد التي يعطيها الضاغط نظراً لانخفاض قيمة $\dot{m}$ كما بينا في البند أ عاليه ، وذلك بفرض أن انتقال الحرارة تم في خط السحب خارج المكان المطلوب تبريده .

هـ) انخفاض معامل أداءالدورة نتيجة البندين (ب) و(د) عاليه .

ومن فوائد انتقال الحرارة إلى خط السحب المساعدة على تجفيف بخار المبرد مما يعمل على حماية الضاغط من دخول بعض سائل المبرد إليه ، فيسبب تلفه ميكانيكياً . وعموماً يجب عزل خط السحب حرارياً لمنع انتقال الحرارة إليه للعيوب التي بيّنّاها سابقاً. ويفضل أن يتم تحميص البخار بعدد محدود من درجات التحميص الفوقية داخل المبخر نفسه ، لحماية الضاغط من دخول قطرات سائل المبرد إليه .

يتعرض خط الطرد من الضاغط إلى فقد حرارة من بخار المبرد الساخن (الغاز الساخن) إلى الجو المحيط . ويعمل هذا الفقد على تقليل الحمل الحراري للمكثف ، مما يساعد على تصغير الحجم المطلوب للمكثف . لذا يفضل عادة ترك هذا الخط عارياً دون عزل حراري، إلا إذا خُشِيَ من حدوث أي ضرر نتيجة لمس السطح الساخن لخط الطرد .

يمكن أيضاً للحرارة أن تنتقل بين الجو المحيط وسائل المبرد بخط السائل بين المكثف وصمام التمدد ، أو بين المستقبل وصمام التمدد . وهناك احتمالان لانتقال الحرارة : إما أن تنتقل من سائل المبرد إلى الجو المحيط أو من الجو المحيط إلى سائل المبرد تبعاً لدرجة حرارة سائل المبرد ودرجة حرارة الجو المحيط . ففي حالة استخدام المكثفات المبردة بالهواء ، تكون درجة حرارة سائل المبرد الخارج من المكثف أعلى عادة من درجة حرارة الجو المحيط بعدة درجات مئوية مما يساعد على انتقال الحرارة من سائل المبرد بخط السائل إلى الجو المحيط ، فيتم تبريده بعدة درجات من التبريد التحتي ، كما هو مبين بشكل ٢.٥ (الحالة ب) . ويؤدي هذا التبريد إلى زيادة قيمة التأثير التبريدي بالمبخر مع المحافظة على معدل سريان المبرد ثابتاً ، أي تحسين سعة التبريد بالدورة ، وبالتالي تحسين معامل أداء الدورة . لذا يفضل في مثل هذه الحالة ترك خط السائل دون عزل حراري . أما في حالة استخدام المكثفات المبردة بالماء فهناك احتمالان : الاحتمال الأول أن تكون درجة حرارة ماء

التبريد مقاربة لدرجة حرارة الجو فيؤدي هذا إلى ارتفاع درجة حرارة سائل التبريد عن درجة حرارة الجو المحيط ، وتنتقل الحرارة عندئذ من سائل المبرد إلى الجو المحيط ، وينتج عن ذلك نفس النتائج التي قدمناها سابقاً عند استخدام المكثفات المبردة بالهواء . أما الاحتمال الثاني فينتج إذا كانت درجة حرارة ماء التبريد تقل ، بدرجة ملحوظة ، عن درجة حرارة الجو المحيط ، مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة سائل المبرد عند الخروج من المكثف عن درجة حرارة الجو المحيط . وتنتقل الحرارة حينئذ من الجو المحيط إلى سائل المبرد ، مما يعمل على تبخير جزء منه . ويؤدي هذا ، بالتالي ، إلى العيوب الآتية :

أ) اضطراب أداء صمام التمدد حيث يعمل الصمام بصورة مرضية فقط إذا كان السريان لا يحوي بخاراً .

ب) تآكل مقعد صمام التمدد نتيجة مرور البخار به .

جـ) انخفاض قيمة التأثير التبريدي بالمبخر نظراً لتبخر جزء من المبرد قبل دخول المبخر.

د) انخفاض سعة التبريد بالدورة نتيجة البند (جـ) ، وبالتالي انخفاض قيمة معامل أداء الدورة .

في الأجزاء السابقة قدمنا تأثير انتقال الحرارة بين الجو المحيط وخطوط المبرد المختلفة ، ويلاحظ هنا عدم دراسة خط المبرد الواصل بين صمام التمدد والمبخر نظراً لقصر هذا الخط ، حيث يوضع صمام التمدد أقرب ما يمكن من المبخر ، وفي بعض الأحيان يُلْغَى هذا الخط كلية ، فيوضع صمام التمدد مباشرة عند وصلة دخول المبخر .

٢.٥.٢ فقد الضغط في خطوط المبرد وفي المكونات المختلفة

ينتج عن سريان المبرد في الخطوط الواصلة بين المكونات المختلفة ، وداخل المكثف والمبخر ، فقداً في الضغط نتيجة احتكاك السريان مع الأسطح المختلفة ، ويؤدي هذا الفقد إلى حيود دورة التبريد عن الدورة المثالية التي قدمناها فيما سبق . ويبين شكل ٢.٦

دورة التبريد الفعلية بعد أخذ فقد الضغط في الاعتبار (الرسم لا يعبر عن الفقد الفعلي لمقدار الضغط ، وفقد الضغط بالرسم مبالغاً فيه للتوضيح فقط) .

بسريان بخار المبرد خلال خط السحب ينخفض الضغط كما هو مبين بالشكل من الضغط P_1 إلى الضغط P_{1A} ، ويتسبب هذا في العيوب الآتية :

أ) ارتفاع قيمة الحجم النوعي لبخار المبرد عند دخول الضاغط مما يعني انخفاض معدل السريان الذي يناوله الضاغط .

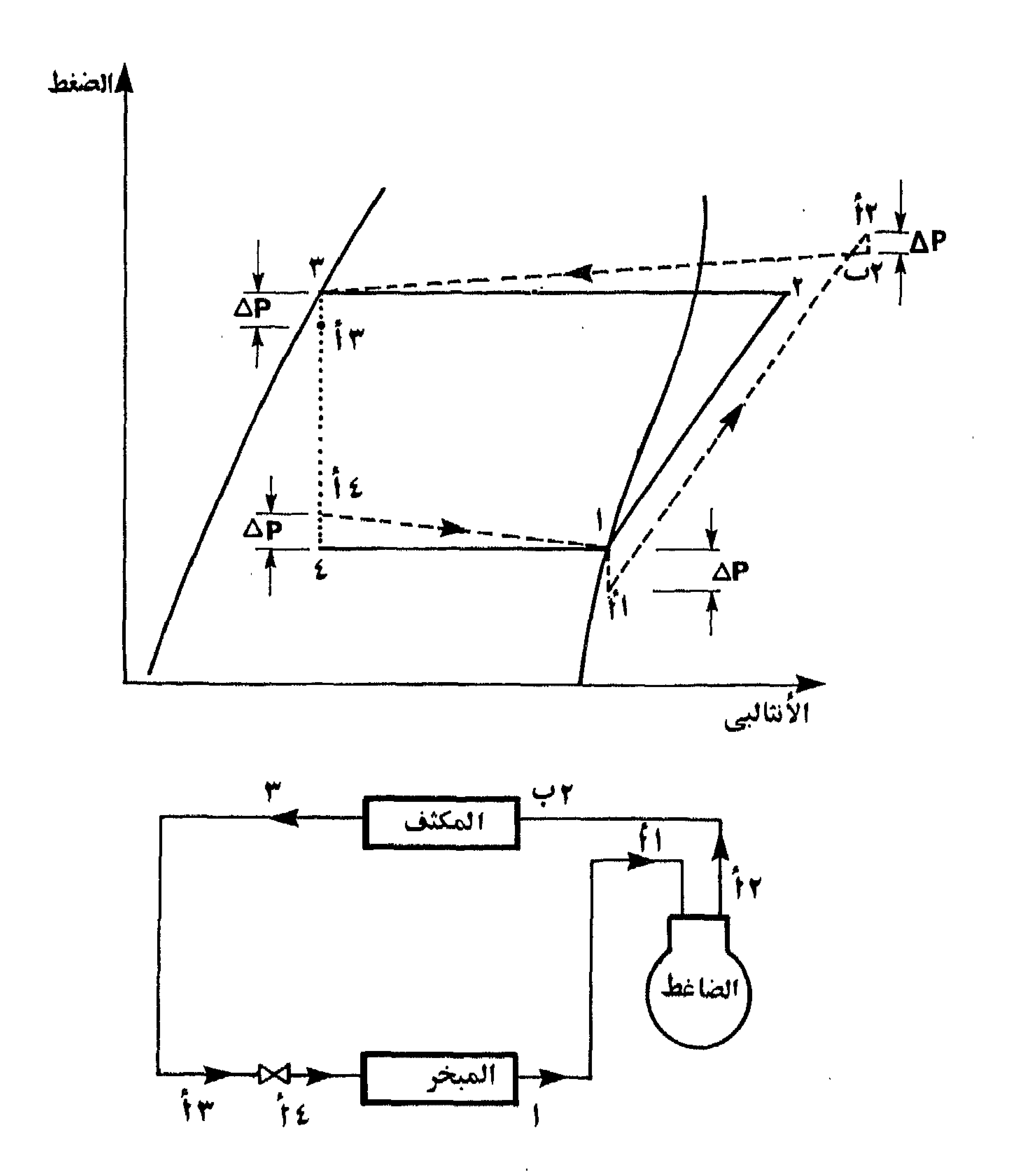
ب) انخفاض سعة تبريد الضاغط نتيجة السبب (أ) سابقاً .

جـ) ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المحمول مع بخار الماء .

لذا يجب على المصمم العمل على خفض فقد الضغط في خط السحب للتخلص من العيوب السابقة . ويتم هذا بخفض سرعة بخار المبرد في خط السحب ، إلا أن هذا يؤدي إلى عدم تمكن بخار المبرد من حمل زيت التزييت إلى الضاغط ، مما يتطلب مرة أخرى رفع السرعة بخط السحب . ويعمل المصمم عندئذ على التوفيق بين مطلبي خفض فقد الضغط بخط السحب ورفع سرعة البخار بخط السحب لحمل زيت التزييت ، ويمكن الرجوع إلى جداول تصميم خطوط السحب لمزيد من التفصيل حول هذا الموضوع [أشراي ١٩٨٦ ، ١٩٩٠] .

يُفْقَد الضغط أيضاً في خط الغاز الساخن بين الضاغط والمبرد (انظر شكل ٢،٦) . ويُهمل هذا الفقد في معظم نظم التبريد حيث يوضع المكثف مباشرة بالقرب من الضاغط مما يعني قصر طول هذا الخط . ألا أن بعض النظم تحوي مكثفات على مسافة بعيدة نسبياً من الضاغط مما يستلزم أخذ فقد الضغط بهذا الخط في الاعتبار . ويسبب فقد الضغط في خط الغاز الساخن العيوب الآتية :

أ) رفع ضغط الطرد بالضاغط مما يؤدي إلى زيادة الشغل اللازم لعملية الانضغاط ، دون تغير معدل سريان المبرد خلال الضاغط .



شكل ٢.٦ فقد الضغط في خطوط المبرد في المكونات المختلفة بدورة التبريد بانضغاط البخار .

ب) خفض معامل الأداء لدورة التبريد .

جـ) رفع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط .

لهذه الأسباب يجب العمل على خفض فقد الضغط في خط الغاز الساخن ما أمكن ، وإن كان هذا يتعارض عادة مع سرعة الغاز اللازمة لحمل زيت التزييت معه . لذا ، ينصح أيضاً عند تصميم هذا الخط الرجوع إلى الجداول الخاصة بذلك [أشراي ١٩٨٦ ، ١٩٨٨] .

يتعرض سريان المبرد في المكثف إلى فقد بالضغط ، وإن كانت المكثفات تصمم عادة لخفض هذا الفقد . ويسبب فقد الضغط بالمكثف نفس العيوب السابقة التي يسببها فقد الضغط بخط الغاز الساخن . ويتراوح فقد الضغط في المكثف عادة بين ١٠ إلى ٢٠ كيلوبسكال .

يتعرض سريان المبرد أيضاً لفقد ضغط في خط السائل من المكثف (أو المستقبل) إلى صمام التمدد . ويسبب هذا انخفاض مقدار التبريد التحتي لسائل المبرد أو تبخر جزء منه ، وذلك تبعاً لحالة المبرد الخارج من المكثف ، وتبعاً لمقدار فقد الضغط . ففي الحالة المبينة بشكل ٢.٦ تسبب فقد الضغط بخط السائل في خفض الضغط من P_3 إلى P_{3A} ، مسبباً تبخر جزء من السائل (انظر حالة المبرد عند الحالة ٣أ مقارنة بالحالة ٣) . ويسبب فقد الضغط في خط السائل العيوب الآتية :

أ) انخفاض ضغط دخول صمام التمدد مما يؤدي إلى اضطراب أداء الصمام .

ب) في حالة تبخر جزء من المبرد قبل دخول صمام التمدد ، يسبب البخار اضطراب أداء صمام التمدد ، كما يسبب تآكل مقعد فتحة الصمام .

ولا يؤدي انخفاض الضغط بخط السائل إلى خفض معدل السريان إلى المبخر حيث أن هذا الفقد كان سيحدث على أية حال في صمام التمدد إذا لم يحدث في خط السائل . لذا لا يهتم المصمم بفقد الضغط في خط السائل إذا كانت درجات التبريد التحتي للسائل الخارج من المكثف أو المستقبل كافية للتغلب على هذا الفقد ، ومنع تبخر جزء منه .

يتعرض سريان المبرد أخيراً لفقد ضغط في المبخر نفسه . بالطبع يهمل عادة فقد الضغط في وصلة الأنابيب بين صمام التمدد والمبخر نظراً لقصر هذه الوصلة ، ما لم يوجد موزع مبرد بين صمام التمدد والمبخر ، عندئذ يعتبر فقد الضغط في الموزع مكملاً لفقد الضغط في صمام التمدد ولا يؤثر بأية حال على أداء دورة التبريد . ويسبب فقد الضغط في المبخر رفع درجة الحرارة المؤثرة في المبخر ، وبالتالي يعمل هذا على رفع درجة حرارة

الحمل الحراري . بمعنى آخر ، يجب على الضاغط العمل عند ضغط سحب أقل من ضغط السحب المناظر للدورة المثالية للحصول على نفس درجة الحرارة المؤثرة للمبخر (أي نفس درجة الحرارة للحمل الحراري) ، مما يؤدي إلى زيادة شغل الانضغاط وبالتالي انخفاض معامل أداء الدورة . أيضاً ، يؤدي هذا إلى زيادة حجم بخار المبرد عند سحب الضاغط ، فينخفض معدل سريان المبرد بالضاغط ، وبالتالي تنخفض سعة تبريده ، وينخفض معامل أداء الدورة مرة أخرى . لذلك يجب تصميم المبخرات عند الحد الأدنى لفقد الضغط بها . ويُقدَّر فقد الضغط بالمبخرات عادة بحوالي من ١٠ إلى ٢٠ كيلو بسكال .

٢.٥.٣ حيود عملية الانضغاط عن عملية الانضغاط المثالية

تتم عملية الانضغاط بالدورة المثالية بعملية أيزنتروبية ، أي عملية أدياباتية انعكاسية . ويصعب عملياً إجراء مثل هذه العملية لعدة أسباب منها

أ) وجود فقد ضغط بالسريان خلال صمامات السحب و/ أو الطرد بالضاغط .

ب) وجود احتكاك بين السريان والسطح الداخلي بالضاغط مما يمنع حدوث عملية انضغاط انعكاسية .

ويؤدي فقد الضغط في صمامي السحب والطرد بالضاغط كما هو مبين بشكل ٢.٧ إلى :

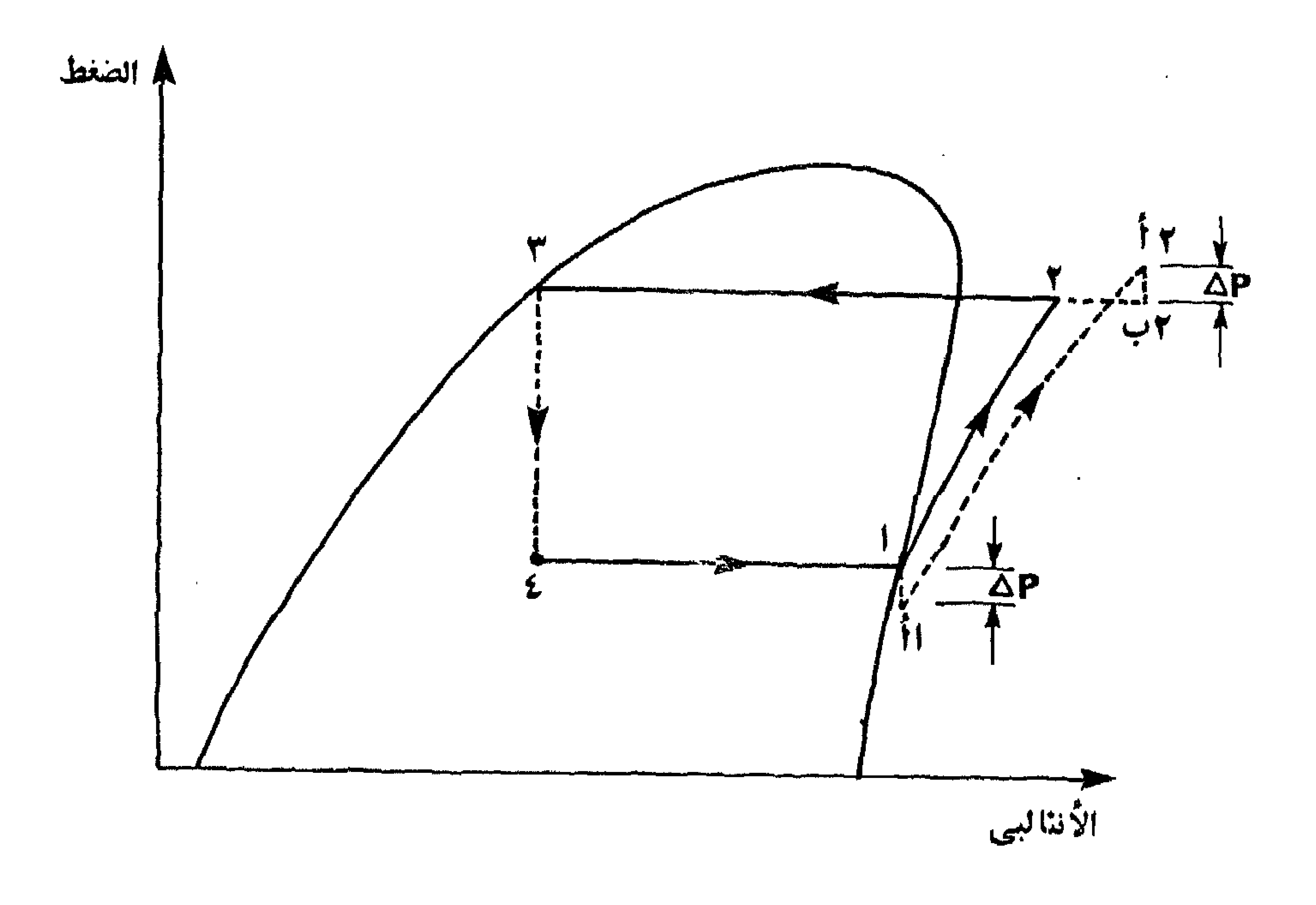
أ) زيادة حجم البخار الداخل إلى الضاغط (نتيجة كبر الحجم النوعي لبخار المبرد عند الحالة ١\ مقارنة بالحالة ١) وبالتالي خفض معدل سريان المبرد الذي يناوله الضاغط، أي خفض سعة تبريد الضاغط .

ب) زيادة شغل الانضغاط لكل وحدة كتل يناولها الضاغط .

جـ) ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط .

ولقد ناقشنا تأثير هذه العيوب من قبل على أداء دورة التبريد في أجزاء سابقة من الفصل الحالي .

ويسبب الانضغاط اللاانعكاسي الأدياباتي ، مقارنة بالانضغاط الانعكاسي



شكل ٢.٧ حيود عملية الانضغاط بالضاغط عن العملية المثالية .

الأدياباتي (قارن الخط ١-٢ والخط ١أ-٢أ في شكل ٢.٧) ، إلى نفس العيبين ب وجـ في الجزء السابق . ويحاول مصممو الضواغط الحد ما أمكن من فقد الضغط في صمامي السحب والطرد ، ويمكن في بعض الضواغط الاستغناء كلية عن صمام السحب (كما هو الحال في الضواغط الدورانية والضواغط اللولبية وضواغط الطرد المركزي) ، و/أو صمام الطرد (كما هو الحال في الضواغط الدورانية متعددة الريش والضواغط اللولبية وضواغط الطرد المركزي أيضاً) . كذلك يجتهد المصممون في اقتراب عملية الانضغاط من العملية الأيزنتروبية ما أمكن لتحسين أداء دورة التبريد .

٢.٥.٤ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار

بعد أخذ جميع الاعتبارات السابقة مجتمعة ، يبين شكل ٢.٨ الدورة الفعلية

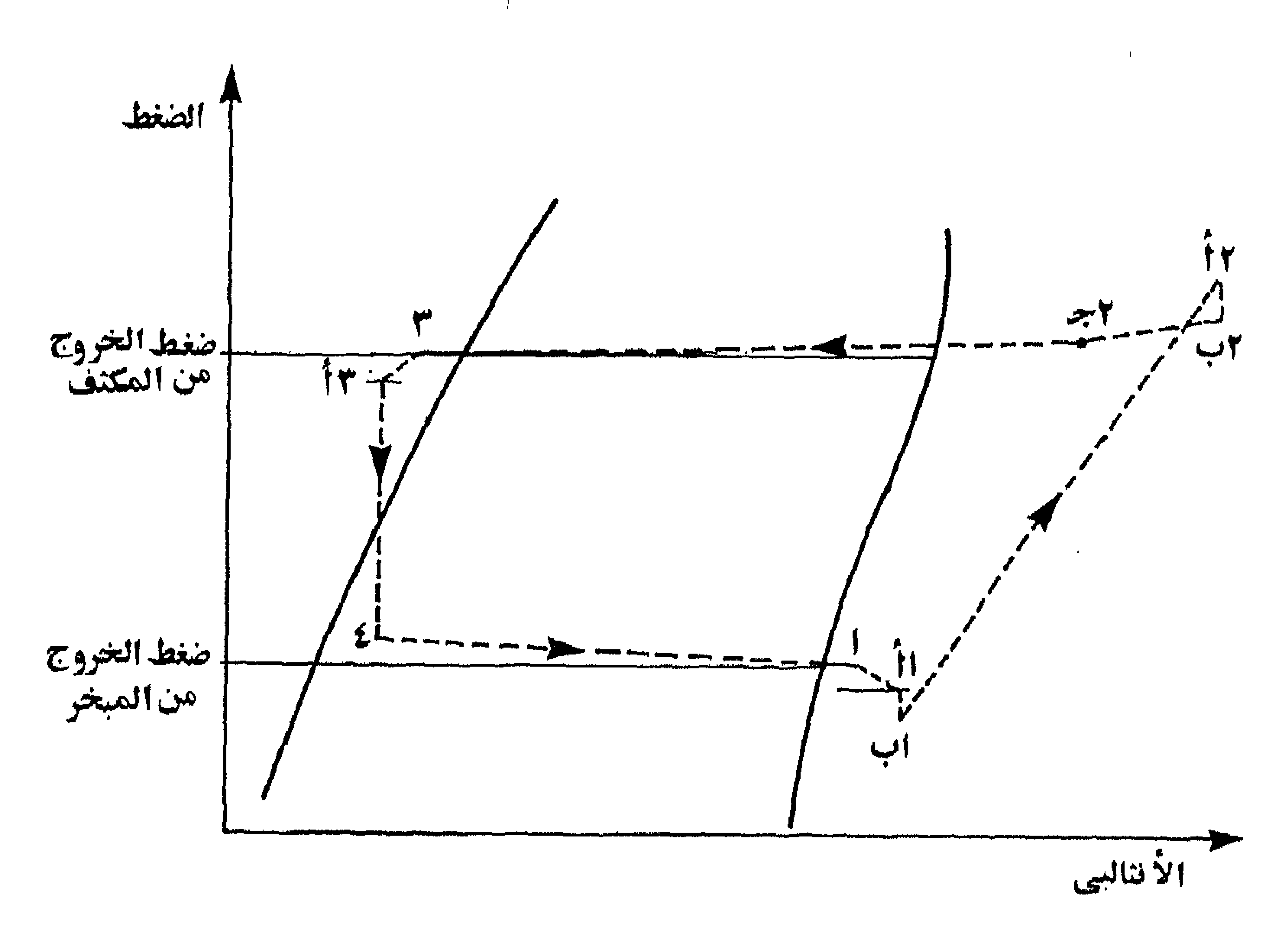
للتبريد بانضغاط البخار موقعة على خريطة الضغط - الأنثالبي . من الشكل لاحظ الآتي :

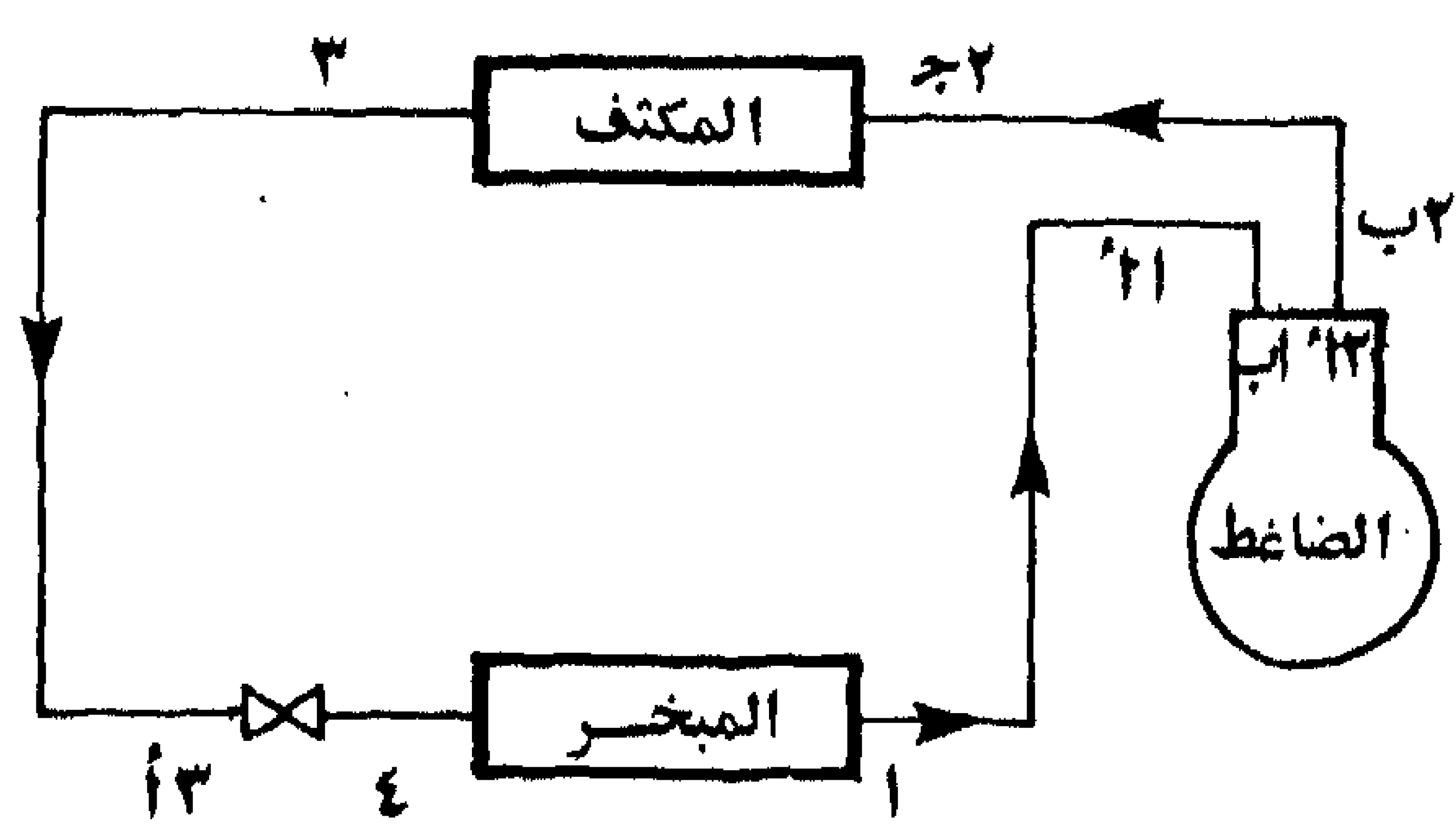
أ) انتقال الحرارة بين المبرد والجو المحيط خلال العمليات ١-١أ و٢ب-٢جـ و٣-٣أ .

ب) فقد الضغط في خطوط المبرد المختلفة وكذلك في المكثف والمبخر .

جـ) فقد الضغط في صمامي السحب والطرد بالضاغط ، وكذلك حيود عملية الانضغاط عن العملية الانعكاسية .

ويوضح المثال التالي التحليل الحراري للدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار.





شكل ٨ . ٢ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار.

مثال ٢.٢

أعد حل مثال ٢.١ بعد أخذ الآتي في الاعتبار :

أ) فقد ضغط قدره ٣٠ كيلوبسكال في كل من خط السحب ، وصمام السحب ، وصمام الطرد.

ب) فقد الضغط في خط الغاز الساخن = ٨٠ كيلوبسكال ، ودرجة حرارة دخول الغاز الساخن = ٦٠ °م .

جـ) فقد الضغط في المكثف = ٦٠ كيلوبسكال .

د) فقد الضغط في خط السائل = ١٢٠ كيلوبسكال .

هـ) فقد الضغط في المبخر = ٣٥ كيلوبسكال .

و) درجة حرارة بخار المبرد عند دخول الضاغط = – ٥ °م .

أفرض خروج سائل المبرد وبخار المبرد من المكثف والمبخر على التوالي في حالتي التشبع، وأفرض عزل خط السائل بين المكثف وصمام التمدد جيداً . أيضاً ، أفرض أن ضغط المكثف عند الخروج = ١١٩٢.١ كيلوبسكال وضغط المبخر عند الخروج = ٢٩٦.٣ كيلوبسكال ، وأن عملية الانضغاط أيزنتروبية .

الحل

من المعلومات المعطاه ، ومن جداول الضغط -الأنثالبي لمبرد ٢٢ في ملحق أ ، يمكن رسم دورة التبريد الفعلية كما هو مبين في شكل ٢.٩ ، ثم إيجاد الخواص عند الحالات المختلفة بالدورة كما هو مبين بجدول ٢.٢ .

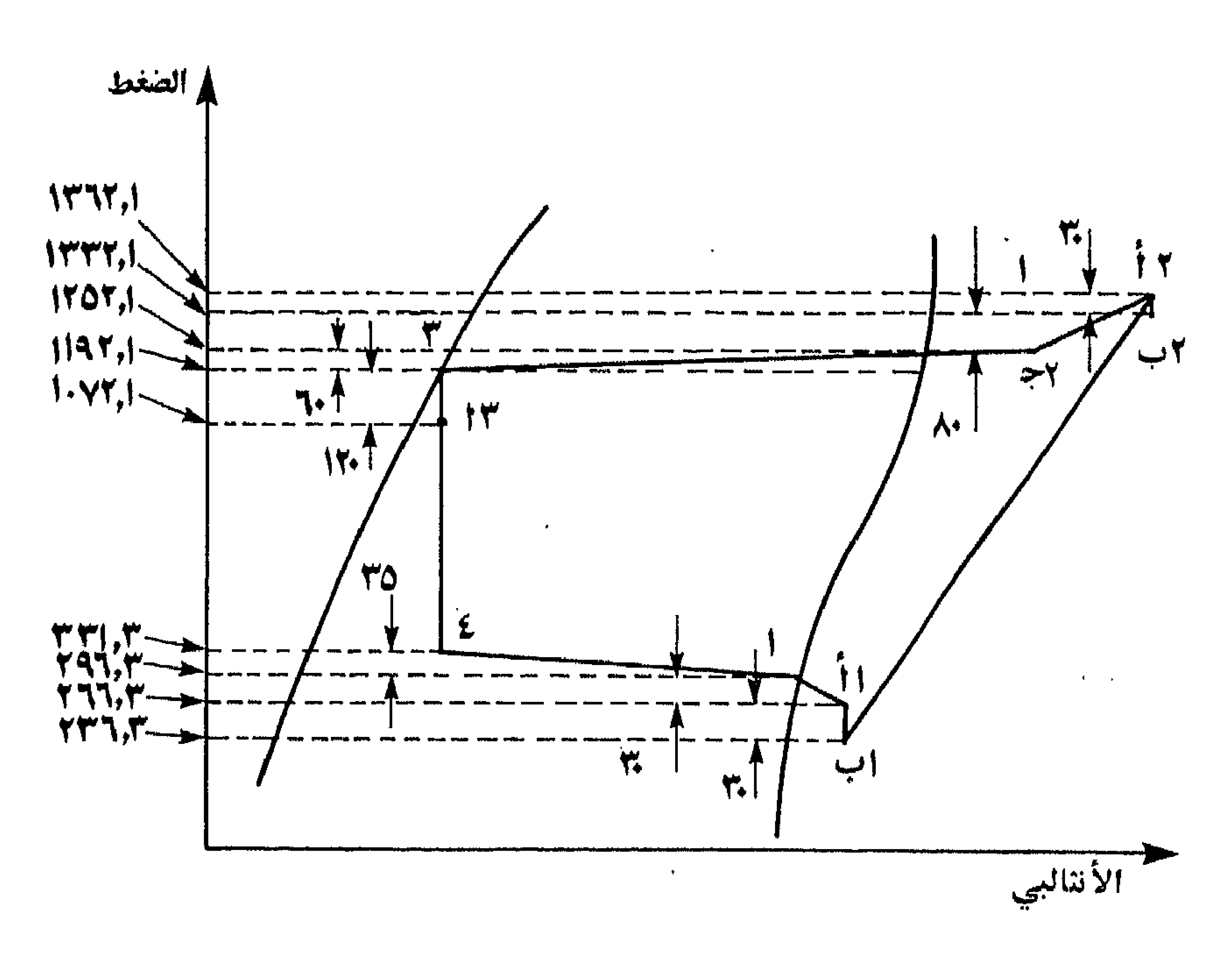
أ) يحسب معدل سريان كتلة المبرد في المبخر كما يلي

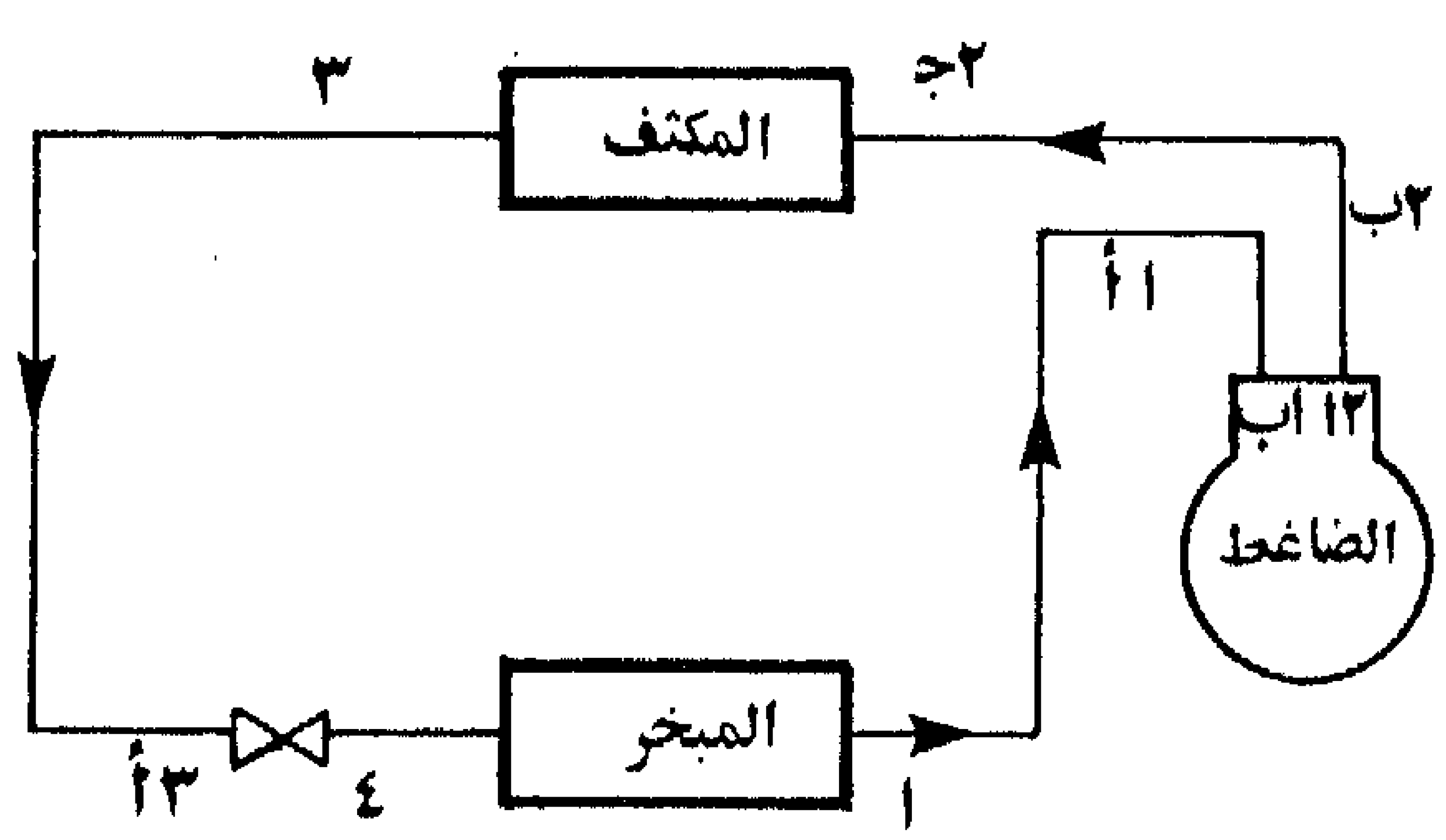
$$\dot{m} = \frac{1}{398.8 - 236.4} = 0.00616 \quad kg/s$$

وهي نفس القيمة المعطاه بمثال رقم ١ . يُحْسَب معدل حجم البخار المسحوب بالضاغط كما يلي

$$\dot{V} = \dot{m}\ v_{1B} = 0.00616 \times 0.1053 = 6.486 \times 10^{-4}\ m^3/s$$

وهو يزيد بحوالي ٣٦ ٪ عن الحجم المسحوب بالضاغط في الدورة المثالية بمثال ٢.١ . لذا يلزم استخدام ضاغط أكبر بالدورة الفعلية للحصول على نفس سعة التبريد في المبخر .





شكل ٩ . ٢ حل مثال ٢ . ٢ .

جدول ٢ . ٢ حل مثال ٢ . ٢ .

الحالة	درجة الحرارة	الضغط	الأنثالبي	الحجم النوعي
	° م	كيلوبسكال	كيلوجول/كجم	م٣/كجم
١	١٥-	٢٩٦.٣	٣٩٨.٨	
١أ	٥-	٢٦٦.٣	٤٠٧	
١ب		٢٣٦.٣	٤٠٧	٠.١٠٥٣
٢أ	٨٧	١٣٦٢.١	٤٦٠	
٢ب		١٣٣٢.١	٤٦٠	
٢جـ	٦٠	١٢٥٢.١	٤٤٠	
٣	٣٠	١١٩٢.١	٢٣٦.٤	
٣أ	٢٦	١٠٧٢.١	٢٣٦.٤	
٤	١١.٩ -	٣٣١.٣	٢٣٦.٤	

ب) يحسب معدل طرد الحرارة من المكثف كما يلي

$$Q_c = 0.00616\ (440\text{-}236.4) = 1.254\ \ \text{kW}$$

أي بزيادة قدرها ٣ ٪ فقط ، وذلك نظراً لتبريد خط الغاز الساخن بالجو المحيط . لاحظ هنا ارتفاع درجة حرارة الغاز الساخن الخارج من الضاغط إلى ٨٧ ° م بدلاً من ٥٢ ° م بالدورة البسيطة بمثال ٢.١ . لذا يفضل في مثل هذه الدورة تبريد الضاغط أثناء عملية الانضغاط لخفض درجة حرارة خروج الغاز الساخن لحماية زيت التزييت من التحلل . ويتم هذا التبريد إما بالماء أو بالهواء .

جـ) تحسب قدرة الانضغاط كما يلي

$$\dot{W} = 0.00616\ (460\text{-}407) = 0.326\ \ \text{kW}$$

أي بزيادة قدرها حوالي ٥٢ ٪ عن الدورة المثالية للحصول على نفس سعة التبريد بالمبخر . ويقدر معامل الأداء عندئذ كما يلي

$$COP = \frac{1}{0.326} = 3.067$$

أي بنقص قدره ٣٤ ٪ عن الدورة المثالية . وتحسب الكفاءة النسبية كما يلي

$$\eta_r = 3.067 \times \frac{(30 + 15)}{(273 - 15)} = 0.535$$

ويلاحظ في الدورة الحالية وجود بخار عند دخول صمام التمدد عند الحالة ٣ أ . ويعمل هذا البخار كما بينا سابقاً على اضطراب أداء صمام التمدد ، وعلى تآكل مقعد الصمام . لذا يجب أن يوجد بالدورة تبريد تحتي بعد الخروج من المكثف لضمان دخول المبرد إلى الصمام في الحالة السائلة .

٢.٦ نظم التبريد احادية المرحلة

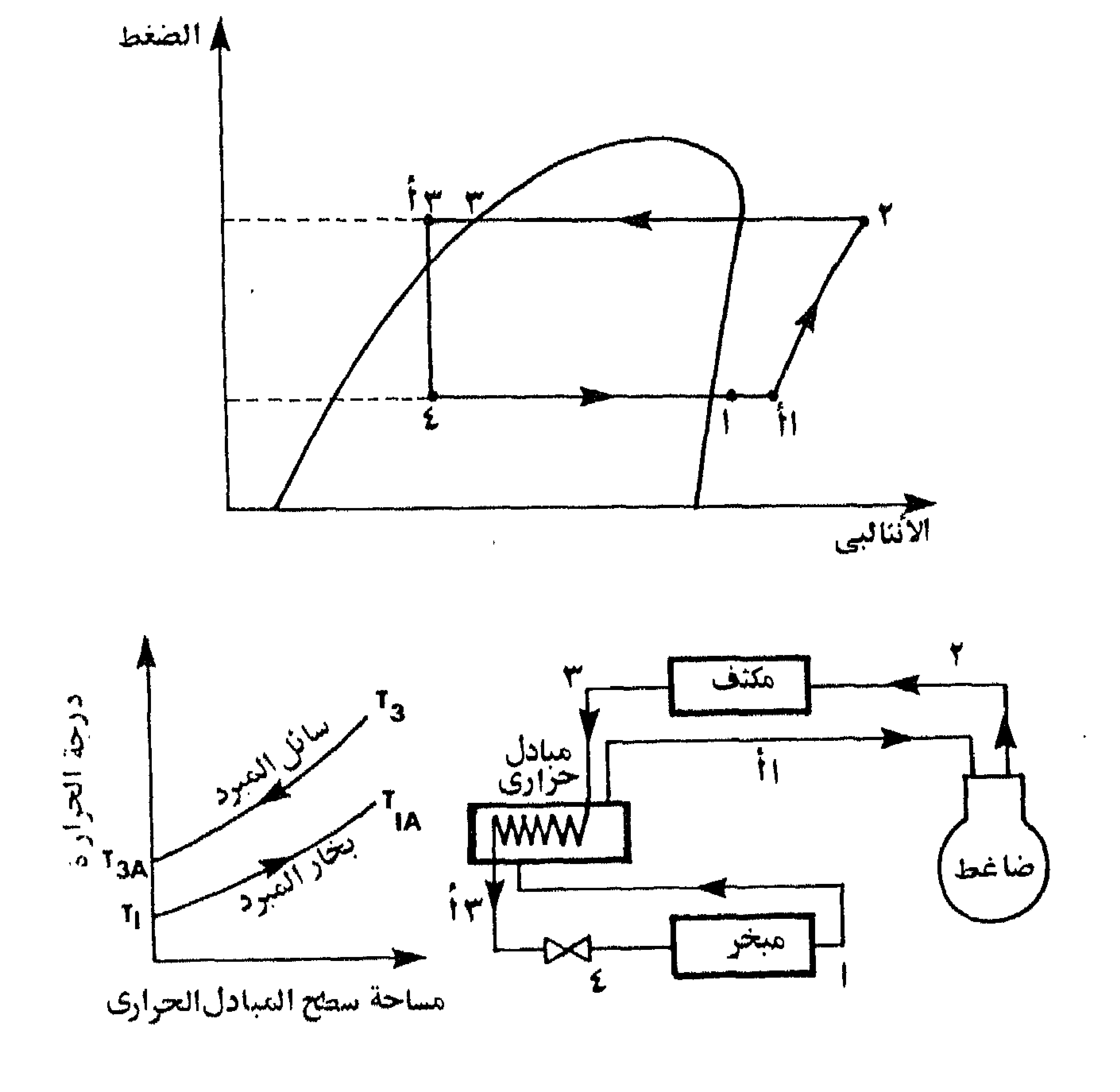
تقسم نظم التبريد ، تبعاً لعدد مراحل الضاغط المستخدم في عملية الانضغاط ، إلى نظم أحادية المرحلة حيث يتم الانضغاط بمرحلة واحدة بالضاغط ، ونظم متعددة المراحل حيث يتم الانضغاط في مرحلتين أو أكثر بالضاغط . وتتبع النظم أحادية المرحلة دورة التبريد بالانضغاط التي قدمناها فيما سبق -إلا أن بعض النظم الأحادية يشمل اختلافاً أو أكثر عن دورة التبريد البسيطة المعطاه في شكل ٢.٩ . ومن هذه الاختلافات ، على سبيل المثال وليس الحصر ، الآتي

أ) استخدام مبادل حراري بين المكثف والمبخر .

ب) استخدام أكثر من مبخر واحد في دورة التبريد الواحدة .

يبين شكل ٢.١٠ نظام تبريد أحادي المرحلة به مبادلاً حرارياً . يستخدم المبادل الحراري للحصول على تبريد تحتي لسائل المبرد الداخل إلى صمام التمدد مما يساعد على

منع وجود بخار للمبرد عند دخول صمام التمدد نتيجة فقد الضغط في خط السائل ، أو انتقال حرارة إلى هذا الخط من الجو المحيط كما قدمنا في جزء ٢ . ٥ . أيضاً يعمل التبريد التحتي الذي يعطيه المبادل الحراري على تحسين التأثير التبريدي للمبخر ، وبالتالي خفض معدل المبرد الذي يناوله الضاغط لكل وحدة سعة تبريد بالمبخر . ويعمل المبادل الحراري على تبريد سائل المبرد الخارج من المكثف أو المستقبل باستخدام بخار المبرد الخارج من المبخر ، كما هو موضح بشكل ٢.١٠ . كما يساعد استخدام المبادل الحراري أيضاً على ضمان دخول بخار المبرد إلى الضاغط في حالة البخار المحمص مما يحمي الضاغط من أي سائل للمبرد قد يدخل إليه فيؤدي إلى تلفه ميكانيكياً .



شكل ٢.١٠ نظام تبريد أحادي المرحلة يحوي مبادلاً حرارياً .

وبأخذ الاتزان الحراري للمبادل الحراري ، يحسب الانخفاض في أنثالبي سائل المبرد في المبادل الحراري كما يلي

$$h_3 - h_{3A} = h_{1A} - h_1 \tag{2.12}$$

ويمثل هذا الانخفاض الزيادة في التأثير التبريدي للمبخر . عندئذ يصبح معدل سريان المبرد في المبخر كما يلي

$$\dot{m} = \frac{Q_e}{h_1 - h_{3A}} \tag{2.13}$$

بينما تحسب قدرة الانضغاط كما يلي (بفرض انضغاط مثالي)

$$W_c = \dot{m}\ (h_2 - h_{1A}) \tag{2.14}$$

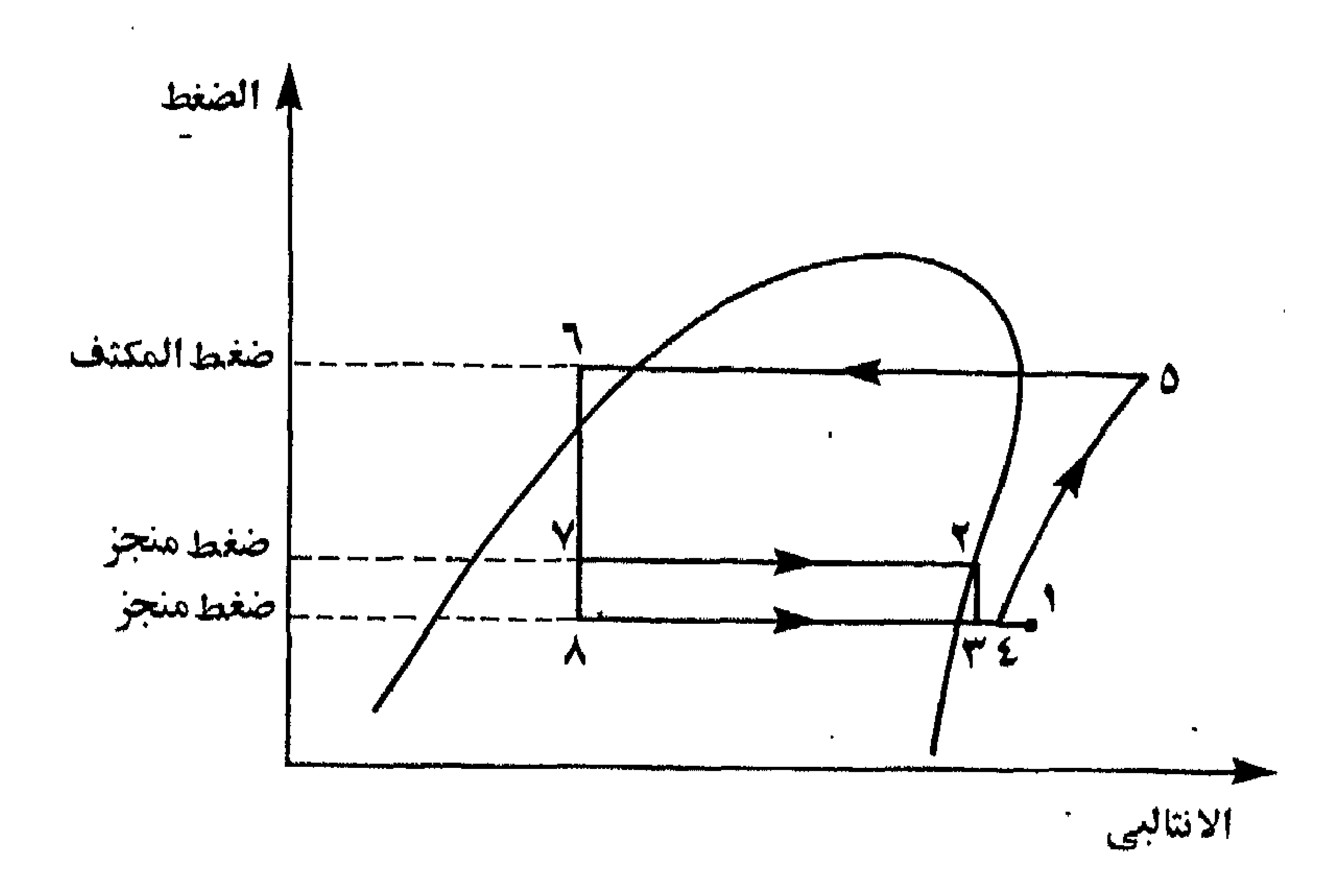
وتحدد فعالية المبادل الحراري المستخدم مقدار التبريد التحتي الذي يعطيه المبادل الحراري. فمثلاً إذا كانت ε هي فعالية المبادل الحراري ، التي تعرف كما يلي

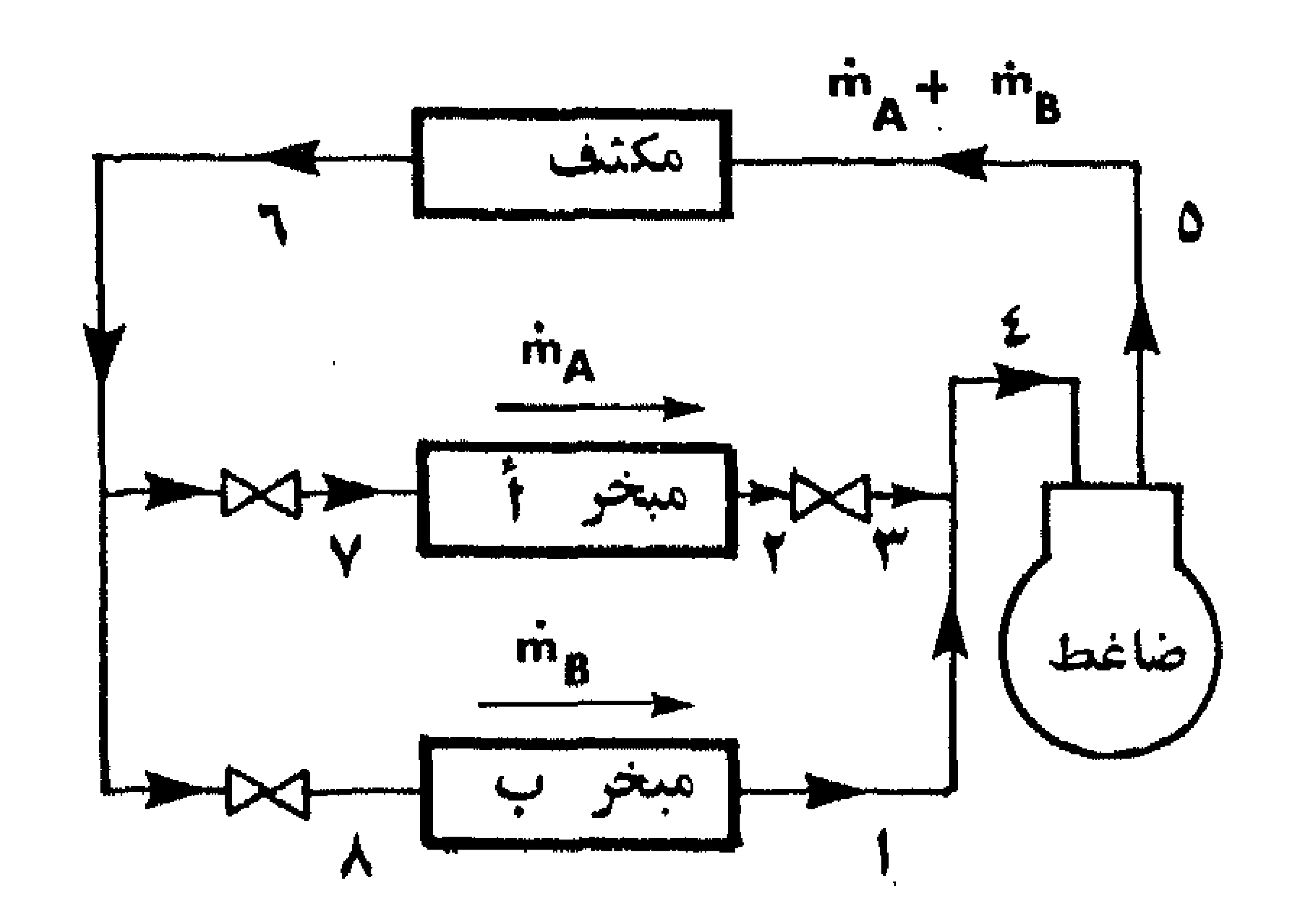
$$\varepsilon = \frac{(T_{1A} - T_1)}{(T_3 - T_1)} \tag{2.15}$$

فإن T_{3A} تحسب من معادلة ٢.١٢ بعد حساب T_{1A} من المعادلة السابقة ، أي أن

$$T_{3A} = T_3 - \frac{C_{pv}}{C_{pl}}\ \varepsilon\,(T_3 - T_1) \tag{2.16}$$

حيث C_{pl} و C_{pv} هي الحرارة النوعية عند ثبات الضغط لسائل المبرد ولبخار المبرد ، على التوالي . وعموماً يؤدي استخدام المبادل الحراري مع مبرد ١٢ أو مبرد ٥٠٢ إلى تحسين طفيف في أداء نظام التبريد مما يخفض من تكلفة التشغيل ، وإن كان بالطبع قد يضيف جزءاً إلى التكلفة الأولية للنظام . أما استخدام المبادل الحراري مع المبردات الأخرى مثل مبرد ٢٢ فلا يؤدي إلى أي تحسين ملموس في أداء نظام التبريد [جوزني ١٩٨٢] .





شكل ٢.١١ نظام تبريد أحادي المرحلة يحوي مبخرين .

يعطي شكل ٢.١١ اختلافاً آخر عن دورة التبريد البسيطة بشكل ٢.٩ ، فيبين الشكل نظام تبريد أحادي المرحلة يحوي مبخرين ، أحدهما يعمل عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً عن الآخر . يوضع صمام تمدد عند دخول كل مبخر للتحكم في سريان المبرد إليه كما هو موضح بالشكل . ويلزم وضع صمام خنق عند الخروج من المبخر " أ " ذو درجة الحرارة المرتفعة نسبياً لخفض ضغط البخار الخارج من هذا المبخر إلى ضغط السحب بالضاغط ،

والمناظر لضغط المبخر " ب " . ويقدر معدل سريان المبرد إلى المبخرين " أ " و" ب " على التوالي كما يلي

$$\dot{m}_A = \frac{(Q_e)_A}{(h_2 - h_6)} \tag{2.17A}$$

$$\dot{m}_B = \frac{(Q_e)_B}{(h_1 - h_6)} \tag{2.17B}$$

ويعمل الضاغط والمكثف بسريان يساوي $(\dot{m}_A + \dot{m}_B)$. وتضم بعض النظم الأخرى ، المستخدمة في العديد من التطبيقات الصناعية ، أكثر من مبخرين في بعض الأحيان . ويلزم التنويه هنا أنه كلما زاد فرق الضغط بين المبخرين ، كلما كانت الدورة أقل ترشيداً للطاقة نظراً لخفض ضغط السريان $\dot{m}_A$ من الحالة ٢ إلى الحالة ٣ دون فائدة حقيقية ، ثم رفع الضغط مرة أخرى بالضاغط . وقد يكون من الأفضل في بعض الأحيان استبدال النظام الموضح بشكل ٢.١١ بنظام آخر ثنائي المرحلة ، أي تُستَخدَم فيه مرحلتان بالضاغط للقيام بعملية الانضغاط .

مثال ٢.٣

أعد حل مثال ٢.١ بعد استخدام مبادل حراري كما هو مبين بشكل ٢.١٠ . أفرض أن درجة حرارة بخار المبرد الخارج من المبادل الحراري تساوي ٢٠ °م .

الحل

أ) باستخدام حل مثال ٢.١ وخرائط وجداول مبرد ٢٢ نجد الضغط والأنثالبي عند الحالات المختلفة بالدورة المبينة بشكل ٢.١٠ ، مع ملاحظة أن الحالة ١ هي حالة بخار مشبع كما هو مُعطى في مثال ٢.١ . ويعطي جدول ٢.٣ ملخصاً لقيم الضغط والأنثالبي عند الحالات المختلفة بالدورة . بأخذ الاتزان الحراري للمبادل الحراري نصل إلى الآتي

جدول ٢.٣ حل مثال ٢.٣ .

الحالة	درجة الحرارة ° م	الضغط كيلوبسكال	الأنثالبي كيلوجول/كجم	الحجم النوعي م³/كجم
١	١٥-	٢٩٦.٣	٣٩٨.٨	
١أ		٢٩٦.٣	٤٢٣.٠	٠.٠٨٣٣
٢	٨٧	٢٩٦.٣	٤٦٣.٠	
٣	٣٠	١١٩٢.١	٢٣٦.٤	
٣أ	٥	١١٩٢.١	٢١٢.٢	
٤	١٥-	٢٩٦.٣	٢١٢.٢	

$$h_{3A} = h_3 - (h_{1A} - h_1)$$

$$= 236.4 - (423 - 398.8) = 212.2 \ \ kJ/kg$$

يحسب معدل سريان كتلة المبرد إلى المبخر عندئذ كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{(398.8 - 212.2)} = 0.00536 \ \ kg/s$$

وعليه يعطي معدل سريان الحجم إلى الضاغط كما يلي

$$\dot{V} = \dot{m} \ v_{1A} = 0.00536 \times 0.0833 = 4.46 \times 10^{-4} \ m^3/s$$

وهو تقريباً نفس القيمة المعطاه بمثال ٢.١ (يمكن إهمال التغيرفي $\dot{V}$) .

ب) من جدول ٢.٣ نلاحظ ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط إلى ٨٧ ° م بالمقارنة بحوالي ٥٢ ° م في مثال ٢.١ ، مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت

المصاحب لبخار المبرد . ويحسب معدل طرد الحرارة من المكثف كما يلي

$$Q_c = 0.00536\ (463.0\text{-}236.4) = 1.215 \quad kW$$

وهي تقريباً نفس القيمة المعطاه بمثال ٢.١ ، أي أن استخدام مبادل حراري لم يؤثر على معدل طرد الحرارة من المكثف .

جـ) تحسب قدرة الضاغط بفرض انضغاط أيزنتروبي كما يلي

$$\dot{W}_c = 0.00536\ (463 - 423) = 0.2144 \quad kW$$

ويقدر معامل أداء الدورة عندئذ كما يلي

$$COP = \frac{1}{0.2144} = 4.66$$

د) تحسب الكفاءة النسبية للدورة من معادلة ٢.٨ كما يلي

$$\eta_r = 4.66\ \frac{(30 + 15)}{(273 - 15)} = 0.813$$

ويلاحظ الآن أن استخدام مبادل حراري لم يغير قيمة حجم البخار بخط سحب الضاغط ، أو الحرارة المطرودة بالمكثف ، أو قدرة الانضغاط ، أو معامل أداء الدورة ، وذلك نظراً لاستخدام مبرد ٢٢ . أما إذا اسْتُخْدِم مبرد ١٢ فمن المتوقع تحسن معامل أداء الدورة . ويستخدم المبادل الحراري مع نظم التبريد المستخدمة لمبرد ٢٢ للحصول على تبريد تحتي في خط السائل للأسباب التي ذكرناها فيما سبق ، وهي : التغلب على فقد الضغط وانتقال الحرارة بخط السائل لمنع وجود بخار مبرد عند دخول صمام التمدد .

مثال ٢.٤

أعد حل المثال السابق باستخدام مبرد ١٢ بدلاً من مبرد ٢٢ .

جدول ٤ . ٢ خواص المبرد عند الحالات المختلفة بدورة التبريد بمثال ٤ . ٢ .

الحالة	درجة الحرارة	الضغط	الأنثالبي	الحجم النوعي
	°م	كيلوبسكال	كيلوجول/كجم	م^{3}/كجم
١	−١٥	١٨٢ . ٧	٣٤٥ . ٧	٠٫٠٠٨٧٠
١أ	٢٠	١٨٢ . ٧	٣٦٧ . ٠	٠٫١٠٧٥
٢	٧٦	٧٤٤ . ٦	٣٩٧ . ٠ *	
٣	٣٠	٧٤٤ . ٦	٢٢٩ . ١	
٣أ		٧٤٤ . ٦	٢٠٧ . ٨	
٤	−١٥	١٨٢ . ٧	٢٠٧ . ٨ **	

* هذه القيمة تصبح ٣٧٢ إذا لم يستخدم مبادل حراري .

** هذه القيمة تصبح ٢٢٩ . ١ إذا لم يستخدم مبادل حراري .

جدول ٥ . ٢ نتائج مثال ٤ . ٢ .

النتائج لكل ١ كيلووات تبريد	دورة التبريد	
	بدون مبادل حراري	بمبادل حراري
معدل سريان المبرد في الضاغط ، كجم/ث	٠٫٠٠٨٥٨	٠٫٠٠٧٢٥
معدل سريان الحجم إلى الضاغط ، م^{3}/ث	$٧ . ٤٦ \times ١٠^{-٤}$	$٧ . ٧٩ \times ١٠^{-٤}$
معدل طرد الحرارة من المكثف ، كيلووات	١ . ٢٢	١ . ٢٢
قدرة الانضغاط ، كيلوات	٠ . ٢٢٦	٠ . ٢١٨
معامل الأداء	٤ . ٤٢	٤ . ٥٩

الحل

يوضح جدول ٢.٤ ملخص الخواص عند الحالات المختلفة بدورة التبريد المعطاه بشكل ٢.١٠ . كما يوضح جدول ٢.٥ ملخص مقارنة النتائج في دورتي تبريد أحدهما بدون مبادل حراري والأخرى بمبادل حراري . لاحظ من النتائج التحسن الطفيف في معامل أداء الدورة .

٢.٧ نظم التبريد متعددة المراحل

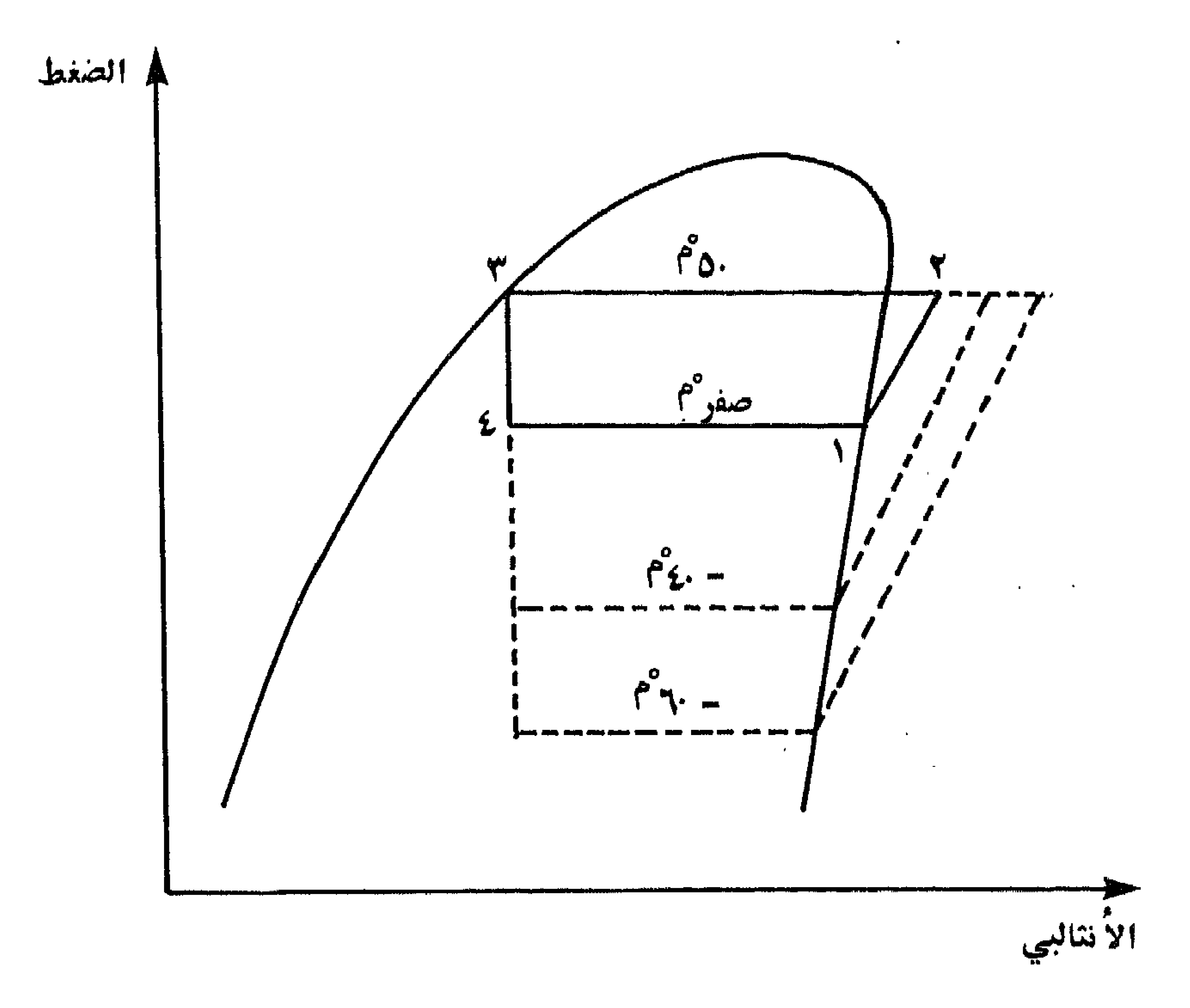
بانخفاض درجة حرارة المبخر يسوء أداء نظم التبريد أحادية المرحلة . ولتوضيح هذا القول دعنا ندرس نظام تبريد أحادي المرحلة يتبع دورة التبريد البسيطة المعطاه بشكل ٢.١ ، ويستخدم مبرد ٢٢ عند درجة حرارة مكثف قدرها ٥٠ ° م ودرجة حرارة مبخر قدرها صفر ° م مع ضاغط ترددي له نسبة خلوص ٣ ٪ (ولمزيد من التفاصيل حول حساب الكفاءة الحجمية للضاغط الترددي يمكن الرجوع إلى الفصل الخامس بالكتاب) . نبدأ الآن في دراسة هذا النظام عند انخفاض درجة حرارة المبخر إلى -٤٠ ° م ، ثم إلى -٦٠ ° م ، كما هو مبين بشكل ٢.١٢ . ويبين جدول ٢.٦ ملخص هذه الدراسة . ويلاحظ من الجدول أنه بانخفاض درجة حرارة المبخر ينتج الآتي :

أ) انخفاض الكفاءة الحجمية للضاغط حتى تصبح قيمة هذه الكفاءة صغيرة جداً عند درجات حرارة منخفضة بالمبخر .

ب) ارتفاع درجة حرارة البخار الخارج من الضاغط ، مما قد يسبب تحلل زيت التزييت المصاحب لبخار المبرد ، وأيضاً قد يسبب إجهادات حرارية بالضاغط نتيجة الفرق الكبير بين درجتي حرارة الدخول والخروج بالضاغط .

جـ) انخفاض معامل أداء نظام التبريد بدرجة كبيرة .

د) زيادة الإجهادات التي تتعرض لها الأجزاء الميكانيكية المتحركة بالضاغط نظراً لكبر نسبة الانضغاط .



شكل ٢.١٢ تأثير انخفاض درجة حرارة المبخر على أداء نظام تبريد أحادي المرحلة يستخدم مبرد ٢٢ .

جدول ٢.٦ تغير أداء نظام تبريد أحادي المرحلة مع انخفاض درجة حرارة المبخر (النظام يتبع دورة تبريد بسيطة عند درجة حرارة مكثف = ٥٠° م باستخدام مبرد ٢٢ وضاغط ترددي له نسبة خلوص = ٣ ٪ ، والنظام له سعة تبريد قدرها ١ كيلووات في المبخر) * .

درجة حرارة المبخر ° م	h_1 كيلوجول/كجم	h_2 كيلوجول/كجم	T_2 ° م	η_v ٪	Q_c كيلووات	COP
صفر	٤٠٤.٦	٤٤٤	٨٠	٩٣	١.٢٨	٣.٥٩
- ٤٠	٣٨٨.١	٤٦٨	١٠٥	٧٠	١.٦٤	١.٥٧
- ٦٠	٣٧٨.٧	٤٨٨	١٢٦	٩	١.٩٤	١.٠٦

* لحساب η_v يمكن الرجوع إلى شكل ٥.٦ في الفصل الخامس .

ولحل المشاكل السابقة ينصح باستخدام نظم تبريد متعددة المراحل حيث تتم عملية الانضغاط بمرحلتين أو أكثر بالضاغط ، مما يساعد على خفض نسبة الانضغاط بكل مرحلة . عندئذ يفضل تبريد بخار المبرد الخارج من أية مرحلة قبل الدخول إلى المرحلة التالية ، لخفض درجة حرارة بخار المبرد الخارج من المرحلة الأخيرة . ولهذا الغرض يُستخدم مبرد بيني، أي بين مرحلتين ، ويعرف هذا المبرد عادة باسم مقتصد نظراً لفائدته في اقتصاد الطاقة اللازمة لتشغيل نظام التبريد . ومن أهم أنواع المبردات البينية المستخدمة، الأنواع الثلاثة التالية :

أ) المبرد البيني المغلق

ب) المبرد البيني المفتوح

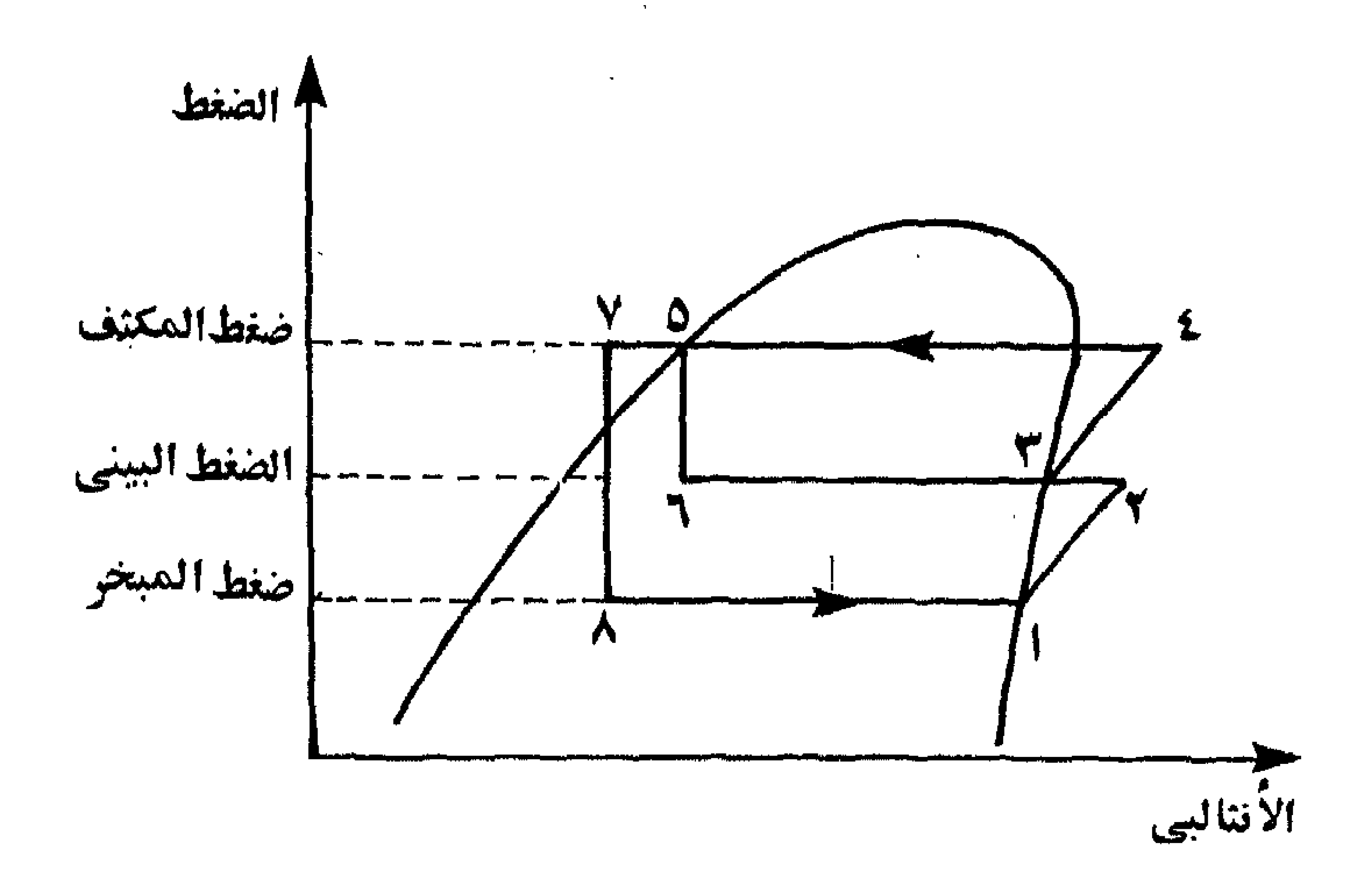
جـ) مبرد المياه البيني .

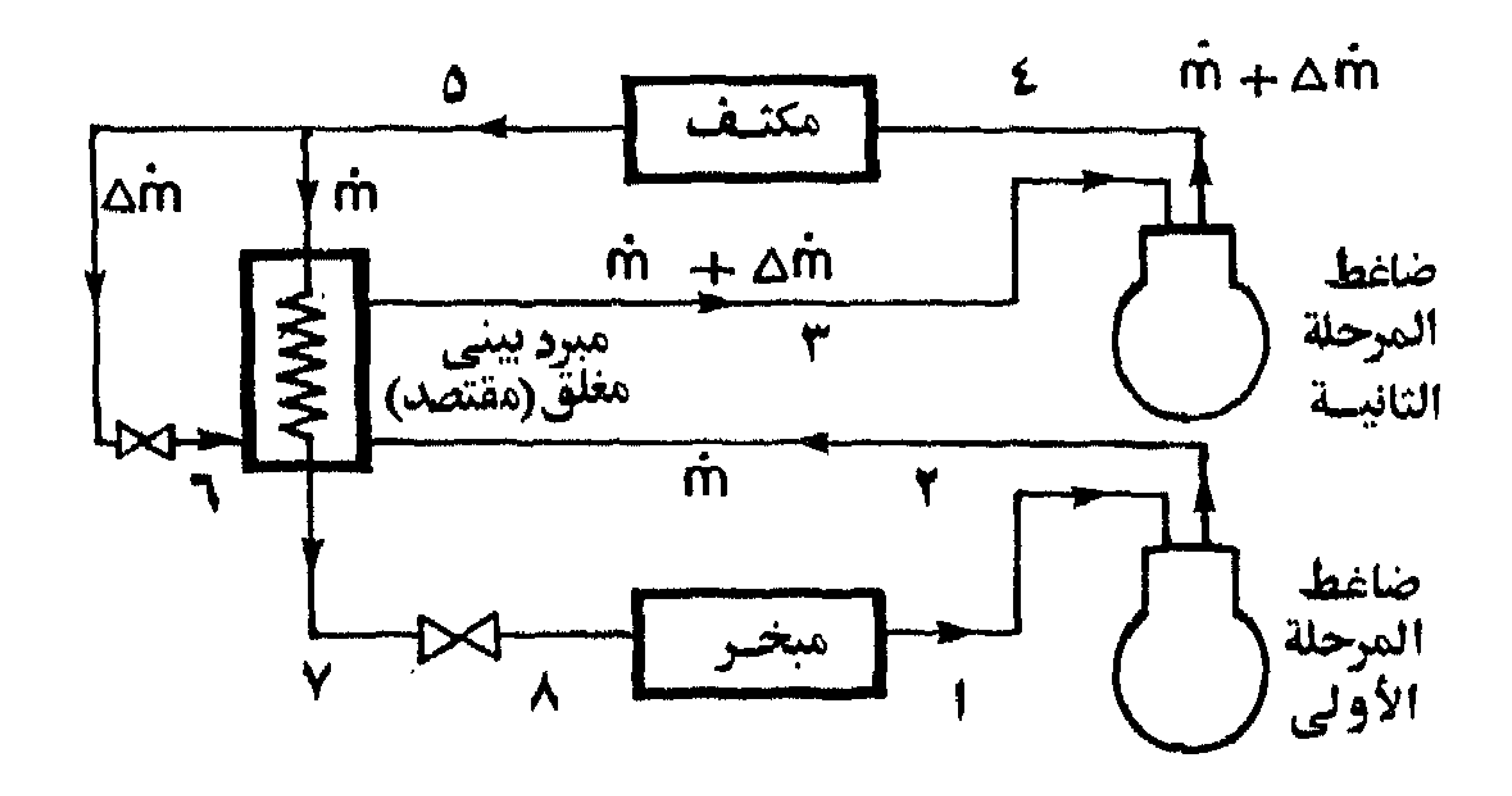
وفيما يلي سنبين بعض نظم التبريد ثنائية المرحلة التي تستخدم المبردات البينية السابقة.

٣.٧.١ المبرد البيني المغلق

يبين شكل ٢.١٣ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مغلقاً . وكما هو موضح بالرسم يعمل هذا المبرد على تبريد بخار الماء الخارج من المرحلة الأولى من الضاغط مما يساعد على خفض درجة الحرارة عند النقطة ٤ . أيضاً يعمل المبرد البيني الموضح بالشكل على زيادة التأثير التبريدي بالمبخر نظراً لزيادة التبريد التحتي لسائل المبرد في المبرد البيني . فكما هو موضح بالشكل يقسم سريان سائل المبرد إلى المبرد البيني إلى سريانين أحدهما $\dot{m}$ والآخر $\Delta\dot{m}$. ويعمل السريان $\Delta\dot{m}$ على تبريد بخار المبرد من الحالة ٢ إلى الحالة ٣ ، وكذلك تبريد سائل المبرد الساري إلى المبخر من الحالة ٥ إلى الحالة ٧ . ويعطي الاتزان الحراري للمبرد البيني العلاقة الآتية

$$(\Delta\dot{m} + \dot{m})\,h_5 + \dot{m}\,h_2 = (\dot{m} + \Delta\dot{m})\,h_3 + \dot{m}\,h_7$$





شكل ٢.١٣ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مغلقاً (مُقْتَصِدْ).

ومنها ينتج الآتي

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_2 - h_3)}{(h_3 - h_5)} \qquad (2.18)$$

ومن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يشترط أن يكون

$$T_7 \geq T_3 \qquad (2.19)$$

وتكون حالة التساوي للعملية المثالية لانتقال الحرارة في المبرد البيني (عندما يكون سطح

انتقال الحرارة لا نهائياً) ، وإلا زادت T_7 عن T_3 .

ويقدر معدل سريان المبرد خلال المبخر كما يلي

$$\dot{m} = \frac{Q_e}{h_1 - h_8} \tag{2.20}$$

حيث Q_e هي معدل التبريد بالمبخر . كذلك تحسب قدرة الانضغاط في نظام التبريد المبين بشكل ٢.١٣ كما يلي (بفرض انضغاط ايزنتروبي)

$$\dot{W}_c = \dot{m}\ (h_2 - h_1) + (\dot{m} + \Delta\dot{m})\ (h_4 - h_3) \tag{2.21}$$

ويوضح المثال التالي كيفية الحسابات المصاحبة لهذا النوع من نظم التبريد .

مثال ٢.٥

في شكل ٢.١٣ كانت درجة حرارة المكثف هي ٥٠° م ودرجة حرارة المبخر هي – ٤٠ ° م ، وكانت درجة حرارة التشبع المناظرة للضغط البيني هي صفر ° م ، وأُستُخْدِمَ مبرد ٢٢ ، أحسب الآتي بفرض ١ كيلووات تبريد في المبخر

أ) أقصى درجة حرارة في نظام التبريد .

ب) معامل أداء نظام التبريد .

جـ) معامل طرد الحرارة، أي الحرارة المطرودة بالمكثف لكل ١ كيلووات تبريد بالمبخر.

افرض حالة التشبع للحالات ١ و ٣ و ٥ ، وافرض أن الانضغاط ايزنتروبي في مرحلتي الضاغط . أيضاً افرض أن درجة الحرارة عند الحالة ٧ تزيد عن درجة الحرارة عند الحالة ٣ بمقدار ١٠ درجات مئوية .

الحل

من جداول مبرد ٢٢ وخرائطه يبين جدول ٢.٧ بعض خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة لنظام التبريد بشكل ٢.١٣ .

جدول ٢.٧ خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة بشكل ١٣.٢ تبعاً لمثال ٢.٥ .

الحالة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨
درجة الحرارة ، °م	-٤٠	٣٠	صفر	٧٨	٥٠	صفر	١٠	-٤٠
الضغط ، كيلوبسكال	١٠٥.٣	٤٩٧.٩	٤٩٧.٩	١١٩٢.١	١١٩٢.١	٤٩٧.٩	١١٩٢.١	١٠٥.٣
الأنثالبي ، كيلوجول/كجم	٣٨٨.١	٤٢٧.٠٠	٤٠٤.٦	٤٤٣	٢٦٣.٠٠	٢٦٣.٠٠	٢١١.٧	٢١١.٧

أ) أقصى درجة حرارة بالنظام هي ٧٨ °م وتحدث عند الحالة ٤ .

ب) يعطي الاتزان الحراري للمبخر الآتي

$$\dot{m} = \frac{1}{(388.1 - 211.7)} = 0.00567 \quad \text{kg/s}$$

ومن الاتزان الحراري للمقتصد (المبرد البيني) نحصل على الآتي

$$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(263-211.7) + (427-404.6)}{(404.6 - 263)} = 0.52$$

ومنها ينتج الآتي

$$\Delta\dot{m} = 0.00295 \quad \text{kg/s}$$

يُحْسَب معامل أداء النظام عندئذ كما يلي

$$COP = \frac{1}{\dot{m}\ (h_2 - h_1) + (\dot{m} + \Delta\dot{m})\ (h_4 - h_3)}$$

$$= \frac{1}{0.00567(427-388.1) + (0.00567+0.00295)\ (443-404.6)}$$

$$= 1.81$$

وهي بالتأكيد أفضل من القيمة المعطاه بجدول ٢.٦ وقدرها ١.٥٧ لنظام يعمل بمرحلة واحدة .

جـ) يُحْسَب معامل طرد الحرارة HRF بالمكثف كما يلي

$$HRF = (\dot{m} + \Delta \dot{m}) \ (h_4 - h_5)$$
$$= (0.00567+0.00295) \ (443\text{-}263) = 1.552$$

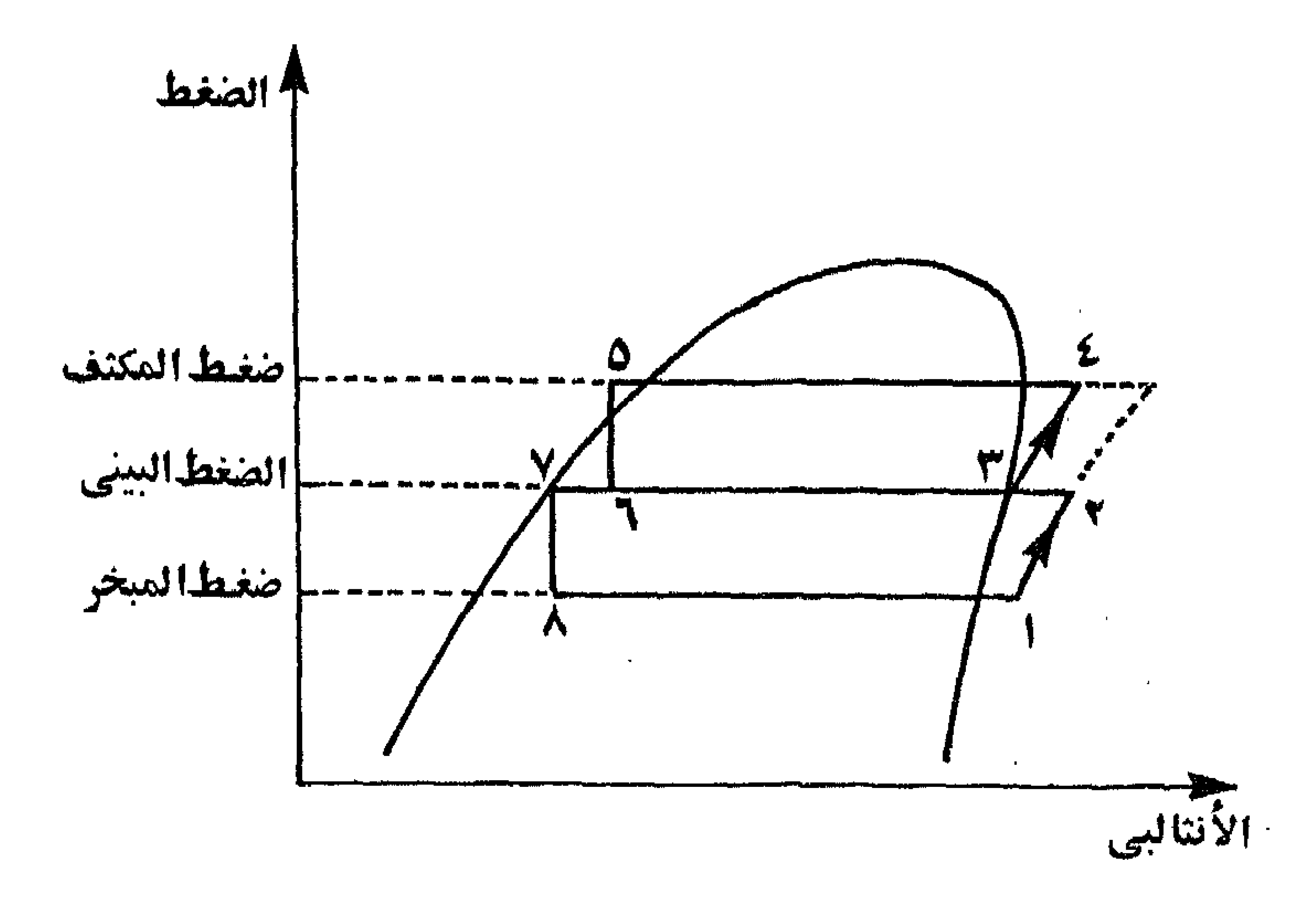
وهي أيضاً أقل من القيمة المعطاه بجدول ٢.٦ لمرحلة واحدة (أي أقل من ١.٦٤) ، مما يعني أن استخدام نظام ثنائي المرحلة بمبرد بيني يقلل الحرارة المطرودة بالمكثف مقارنة بنظام أحادي المرحلة.

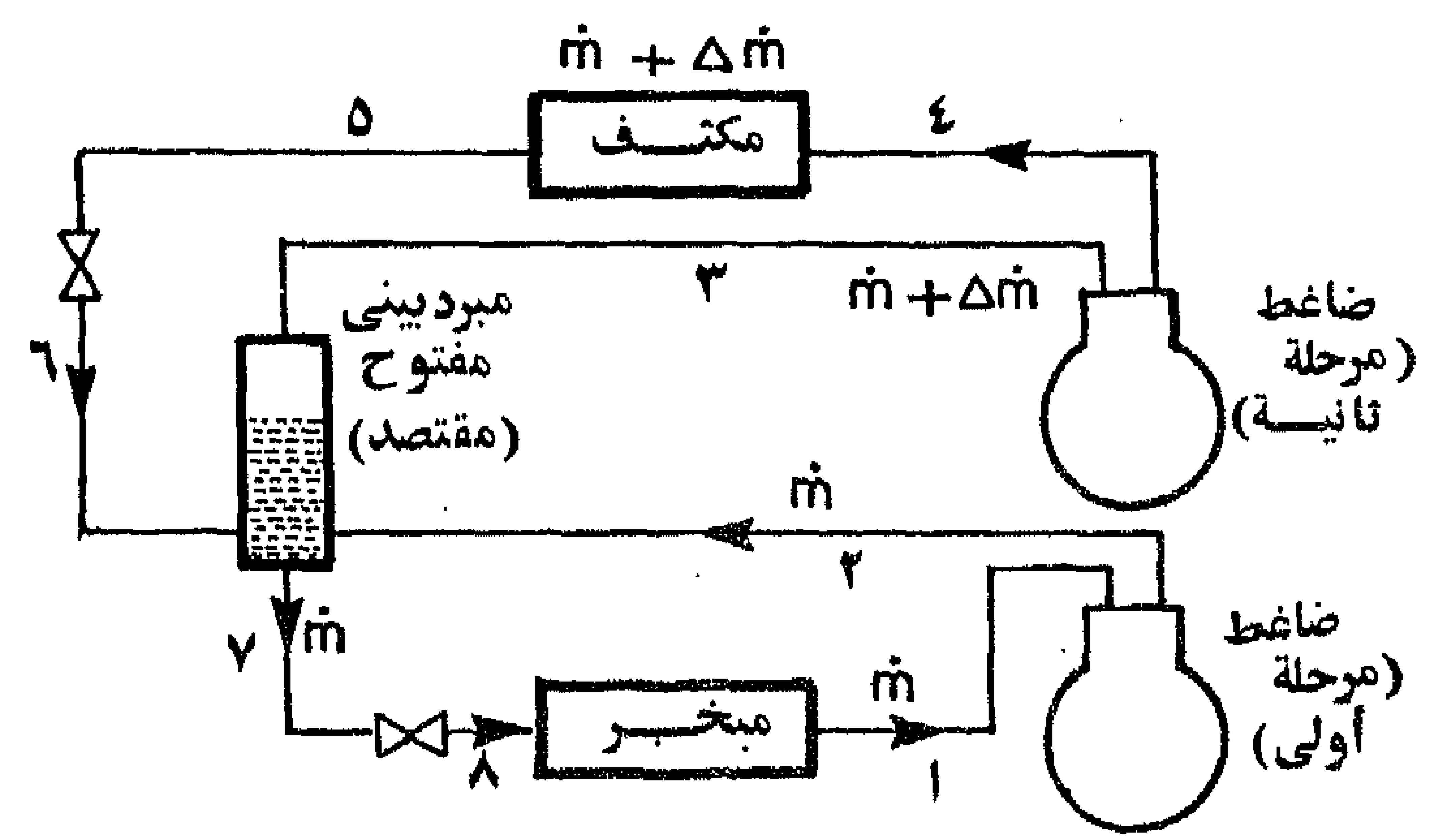
٢.٧.٣ المبرد البيني المفتوح

يوضح شكل ٢.١٤ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مفتوحاً (مُقْتَصِدْ). وينتج عن استخدام المبرد البيني تبريد بخار المبرد من الحالة ٢ إلى الحالة ٣ ، بالاضافة إلى تبريد سائل المبرد من الحالة ٥ إلى الحالة ٧ مما يزيد التأثير التبريدي للمبخر . وبالمثل لحالة المبرد البيني المغلق ، فإن الاتزان الحراري للمبرد المبيني المفتوح يعطي العلاقة الآتية

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_2 - h_3)}{(h_3 - h_5)} \tag{2.22}$$

وهي نفس العلاقة السابقة للمبرد البيني المغلق مع ملاحظة أن التبريد التحتي في حالة المبرد البيني المفتوح يساوي التبريد التحتي للحالة المثالية للمبرد البيني المغلق ، أي عندما تساوي T_7 درجة الحرارة T_3 . ويُحْسَب الشغل بمرحلتي الضاغط بنفس المعادلة السابقة لحالة استخدام المبرد البيني المغلق .





شكل ٢.١٤ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مفتوحاً (مُقْتَصِدْ) .

ويجب أن يُراعَى عند استخدام المبرد البيني المفتوح أن يوضع أقرب ما يمكن إلى المبخر مع عزله حرارياً للحد من انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى سائل المبرد الساري إلى صمام التمدد ، ولخفض فقد الضغط خلال خطوط المبرد الواصلة إلى صمام التمدد ، حيث يعمل انتقال الحرارة وفقد الضغط على تبخير جزء من سائل المبرد قبل الدخول إلى صمام التمدد مما يؤدي إلى خلل في أداء الصمام وتلفه في بعض الأحيان ، كما بينا سابقاً . أما إذا تعذر وضع المبرد البيني المفتوح بالقرب من المبخر فيلزم عندئذ إيجاد وسيلة لتبريد سائل المبرد تحتياً ، مثل استخدام مبادل حراري (كما قدمنا سابقاً) لمنع تبخر سائل

المبرد قبل دخول صمام التمدد .

مثال ٢.٦

أعد حل مثال ٢.٥ باستخدام شكل ٢.١٤ ، وبفرض حالة التشبع للحالات ١ و ٣ و ٥ و ٧ .

الحل

يعطي جدول ٢.٧ أيضاً خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة بشكل ٢.١٤ ماعدا أنثالبي نقطتي ٧ و ٨ ، ودرجة حرارة نقطة ٧ . وتعطي أنثالبي نقطتي ٨.٧ كما يلي

$$h_7 = h_8 = 200 \text{ kJ/kg}$$

أ) أقصى درجة حرارة هي ٧٨ °م وتحدث عند الحالة ٤

ب) بتكرار نفس الخطوات بمثال ٢.٥ ينتج الآتي

$$\dot{m} = 0.00532 \quad \text{kg/s}$$

$$\Delta\dot{m} = 0.603 \times 0.00532 = 0.00321 \quad \text{kg/s}$$

$$COP = \frac{1}{0.00532(427-388.1) + 0.00853 \quad (443-404.6)}$$

$$=1.87$$

أي أن معامل الأداء للنظام قد تحسن باستخدام مبرد بيني مفتوح مقارنة باستخدام مبرد بيني مغلق .

جـ) باتباع نفس خطوات المثال السابق ينتج أن

$$HRF = 0.00853 \ (443-263) = 1.535$$

ويلاحظ أيضاً انخفاض معدل الحرارة المطرودة من المكثف باستخدام مبرد بيني مفتوح بدلاً من المبرد البيني المغلق .

٣.٧.٢ مبرد المياه البيني

تستخدم بعض النظم ثنائية المرحلة (أو متعددة المراحل) أيضاً مبرد مياه بيني لتبريد بخار المبرد قبل الدخول إلى المبرد البيني المفتوح أو المغلق أو قبل الدخول إلى المرحلة التالية مباشرة . ويعمل مبرد المياه على تحسين أداء نظام التبريد ، نظراً لخفض قيمة $\Delta \dot{m}$ بالنظام ، وبالتالي خفض قدرة الانضغاط بالمرحلة الثانية بالضاغط ، مما يؤدي إلى تحسين معامل أداء النظام . ويلزم لاستخدام هذا المبرد أن تزيد درجة حرارة بخار المبرد عند النقطة ٢ عن درجة حرارة مياه التبريد بقدر محسوس ، وإن كان هذا الشرط لا يتوفر في أحوال كثيرة مما يمنع استخدام مبرد المياه البيني . ويوضح شكل ٢.١٥ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرد مياه بيني بالإضافة إلى مبرد بيني مفتوح . ويعطي الاتزان الحراري للمبرد البيني المفتوح العلاقة التالية :

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_{2A} - h_3)}{(h_3 - h_5)} \tag{2.23}$$

وتعتمد درجة الحرارة T_{2A} على الفعالية ε لمبرد المياه المستخدم ودرجة الحرارة T_{wi} لدخول مياه التبريد إلى مبرد المياه . فبفرض مبرد مياه بسريانات مضادة كما هو مبين بالشكل فإن درجة الحرارة T_{2A} تكون

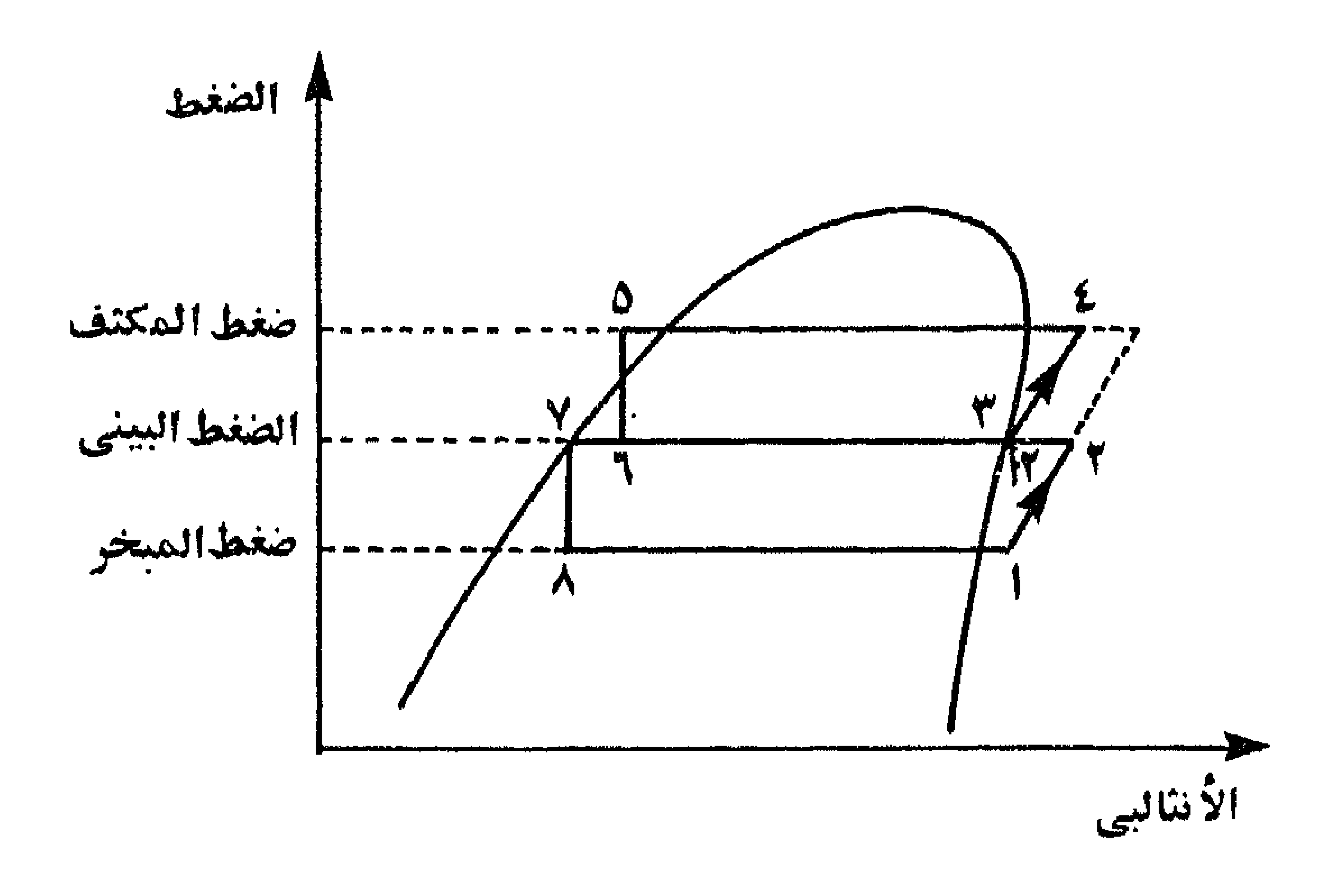
$$T_{2A} = T_2 - \varepsilon (T_2 - T_{wi}) \tag{2.24}$$

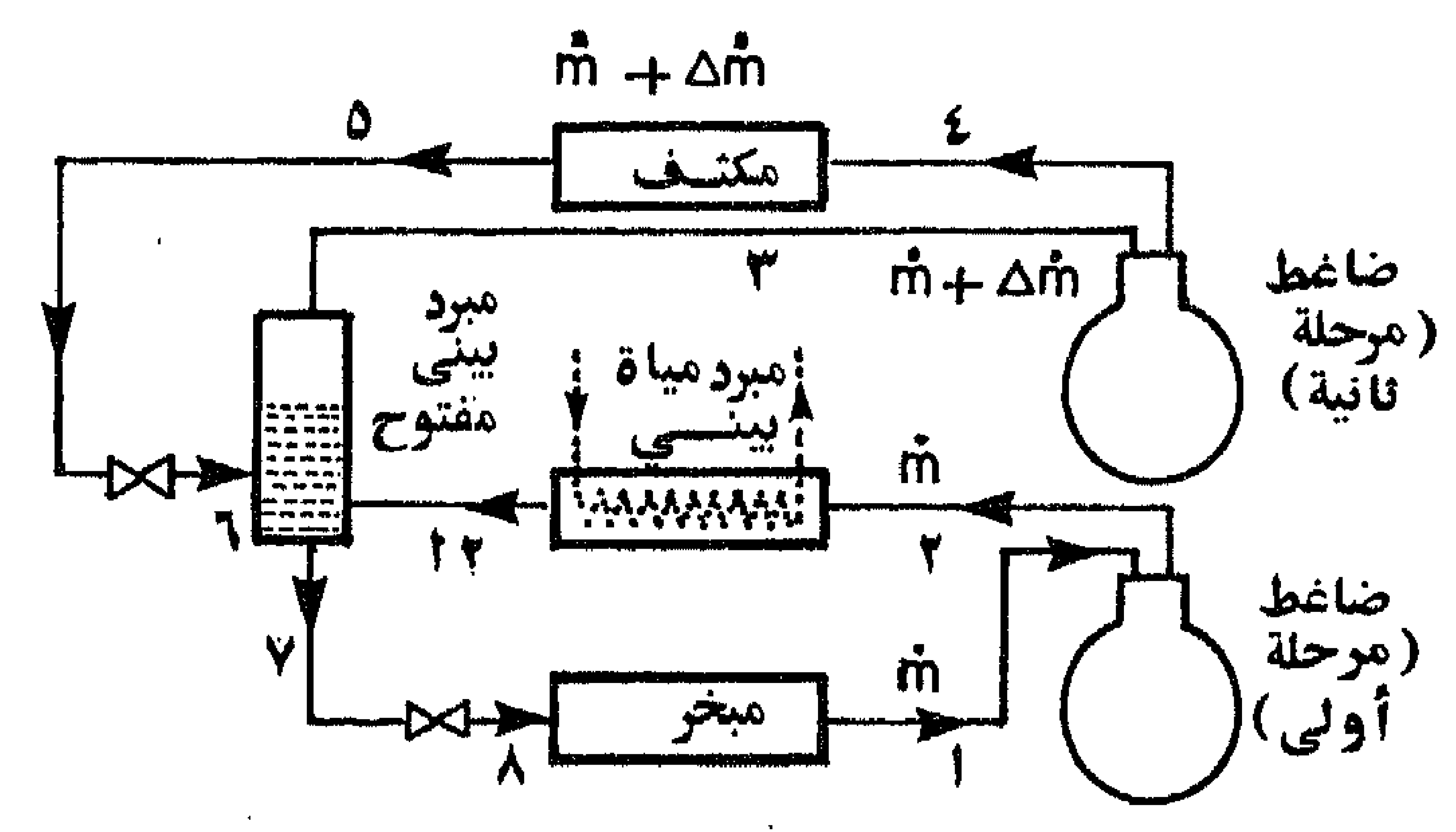
عندئذ تحسب الحرارة المطرودة في مبرد المياه البيني كما يلي

$$\dot{Q}_w = \dot{m} \; (h_2 - h_{2A}) \tag{2.25}$$

٤.٧.٢ عدد المراحل والضغط البيني في النظم متعددة المراحل

من المهم الآن أن يعرف مهندس التبريد متى يُفَضَّل أن يكون نظام التبريد أحادي



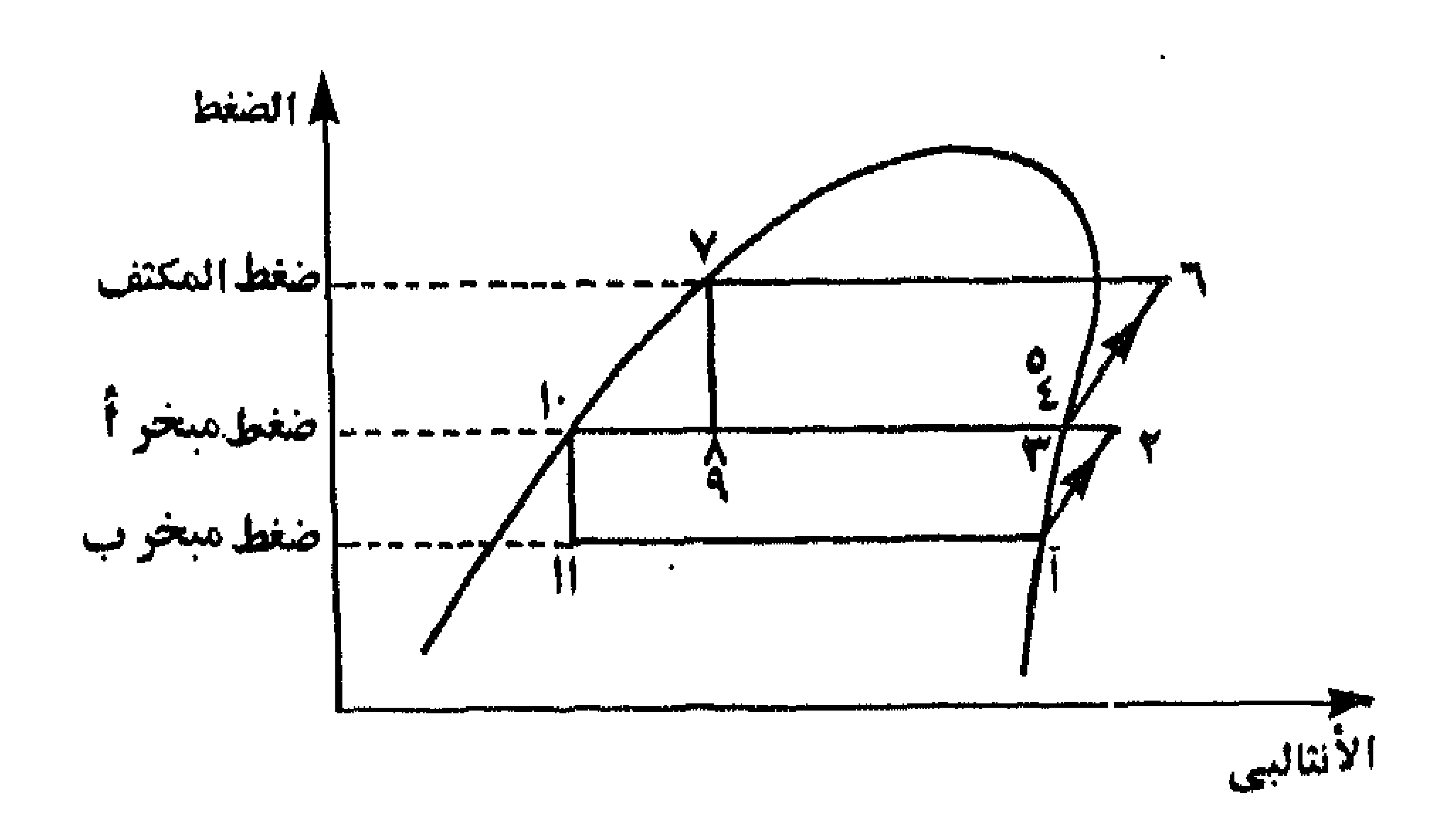


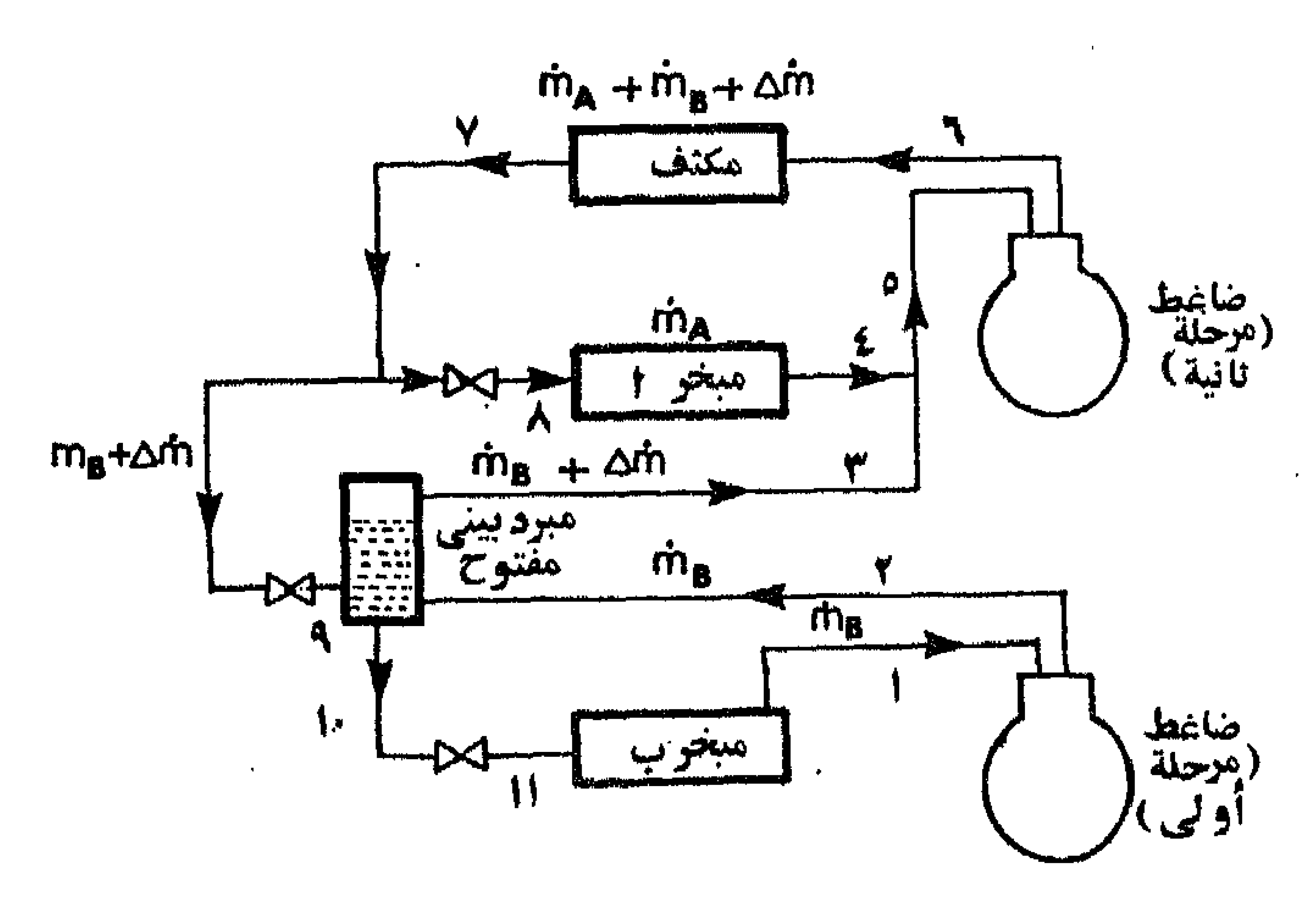
شكل ٢.١٥ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرد مياه بيني ومبرد بيني مفتوح .

المرحلة أو ثنائي المرحلة ، أو ثلاثي المرحلة ، لأنه بالرغم من تحسن أداء نظام التبريد بزيادة عدد المراحل إلا أن التكلفة الأولية للنظام تزيد بالطبع بزيادة هذا العدد . ولقد أورد ثريلكيلد (١٩٧٠) أنه لمبردات ١٢ و ٢٢ والأمونيا يفضل استخدام النظم وحيدة المرحلة إذا زادت درجة حرارة المبخر عن حوالي - ٢٩ °م ، أما إذا تراوحت درجة حرارة المبخر بين - ٦٠ °م و - ٣٠ °م فيفضل استخدام مرحلتين بعملية الانضغاط ، فإذا قلت درجة حرارة المبخر عن -٦٠ °م يُفَضَّل استخدام ثلاث مراحل بالضاغط . ويعتمد الحد الأدني المسموح به

لدرجة حرارة المبخر في نظم التبريد متعددة المراحل على خواص المبرد المستخدم بها . ولقد أورد ثريلكيلد ، أيضاً ، أن الحد الأدنى لدرجة حرارة المبخر للنظم ثلاثية المرحلة هي -٧٦ °م للأمونيا ، و -٧٨ °م لمبرد ١٢ و -٨٦ °م لمبرد ٢٢ .

ولا يمكن الأخذ بالتقسيم السابق لتعدد المراحل الذي أورده ثريلكيلد كحد فاصل في جميع الأحوال ، حيث يكون نوع التطبيق المستخدم سبباً هاماً لتحديد عدد المراحل المستخدمة ، بدلاً من درجة حرارة المبخر ، كما بينا سابقاً . فمثلاً ، إذا كان هناك نظام به مبخران يعملان عند درجتي حرارة تزيد أحدهما عن الأخرى بقدر محسوس ، فقد يكون من





شكل ٢.١٦ نظام تبريد ثنائي المبخر ، ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مفتوحاً .

الأفضل اقتصادياً (من حيث تكلفة التشغيل) أن يكون نظام التبريد ثنائي المرحلة ، بالرغم من ارتفاع درجة حرارة كل مبخر عن - ٢٩ °م (وهي الدرجة التي أوردها ثريلكيلد لاستخدام مرحلتين بدلاً من مرحلة واحدة) . ويبين شكل ٢.١٦ واحداً من هذه النظم .

ولقد أجريت العديد من الأبحاث لدراسة أفضل قيمة للضغط البيني للنظم متعددة المراحل . ولقد أورد دوسات (١٩٨١) والأشراي (١٩٩٠) أن أفضل نسبة للضغط في كل مرحلة من مراحل النظام المستخدم يجب أن تعطى كما يلي

$$r = \sqrt[i]{P_c / P_e} \tag{2.26}$$

حيث P_c و P_e هي على التوالي ضغط المكثف وضغط المبخر ، و i هي عدد المراحل بالنظام أي ٢ أو ٣ . إلا أن هذه النسبة لا تكون هي النسبة المستخدمة في بعض النظم لأسباب عملية متعددة . فمثلاً إذا حوى نظام ثنائي المرحلة مبخرين عند درجتي حرارة مختلفتين ، فيفضل عندئذ أن يكون الضغط البيني مناظراً لضغط المبخر عالي درجة الحرارة، كما هو الحال في شكل ٢.١٦ . أيضاً ، قد تحدد مواصفات ضاغط المرحلة الأولى وضاغط المرحلة الثانية قيمة الضغط البيني . فمثلاً إذا أُستُخدِمَ ضاغط ترددي به أربع أسطوانات للعمل في نظام ثنائي المرحلة ، بحيث تعمل ثلاث من الأسطوانات في المرحلة الأولى ذات الضغط المنخفض ، بينما تعمل أسطوانه واحدة فقط في المرحلة الثانية ذات الضغط المرتفع ، وبفرض نظام تبريد يماثل النظام المبين بشكل ٢.١٤ فإن الضغط البيني الناتج من اتزان تشغيل المرحلة الأولى مع المرحلة الثانية بالضاغط يمكن الحصول عليه من حل المعادلتين اللاخطيتين الآتيتين

$$\dot{m} = \frac{3}{v_1} \overline{PD} \ \eta_{v\,1} \tag{2.27}$$

$$\dot{m} + \Delta \dot{m} = \frac{1}{v_5} \overline{PD} \ \eta_{v\,2} \tag{2.28}$$

حيث $\overline{PD}$ هي إزاحة الكباس النظرية لأسطوانة واحدة ، و $\eta_{v\,1}$ و $\eta_{v\,2}$ هما الكفاءة الحجمية للضاغط الترددي بالمرحلة الأولى والمرحلة الثانية على التوالي ، و v هي الحجم النوعي لبخار المبرد عند الحالة المعنية . ولمزيد من التفاصيل عن حسابات الضاغط الترددي ، يمكن للقارئ الرجوع إلى الفصل الخامس من الكتاب .

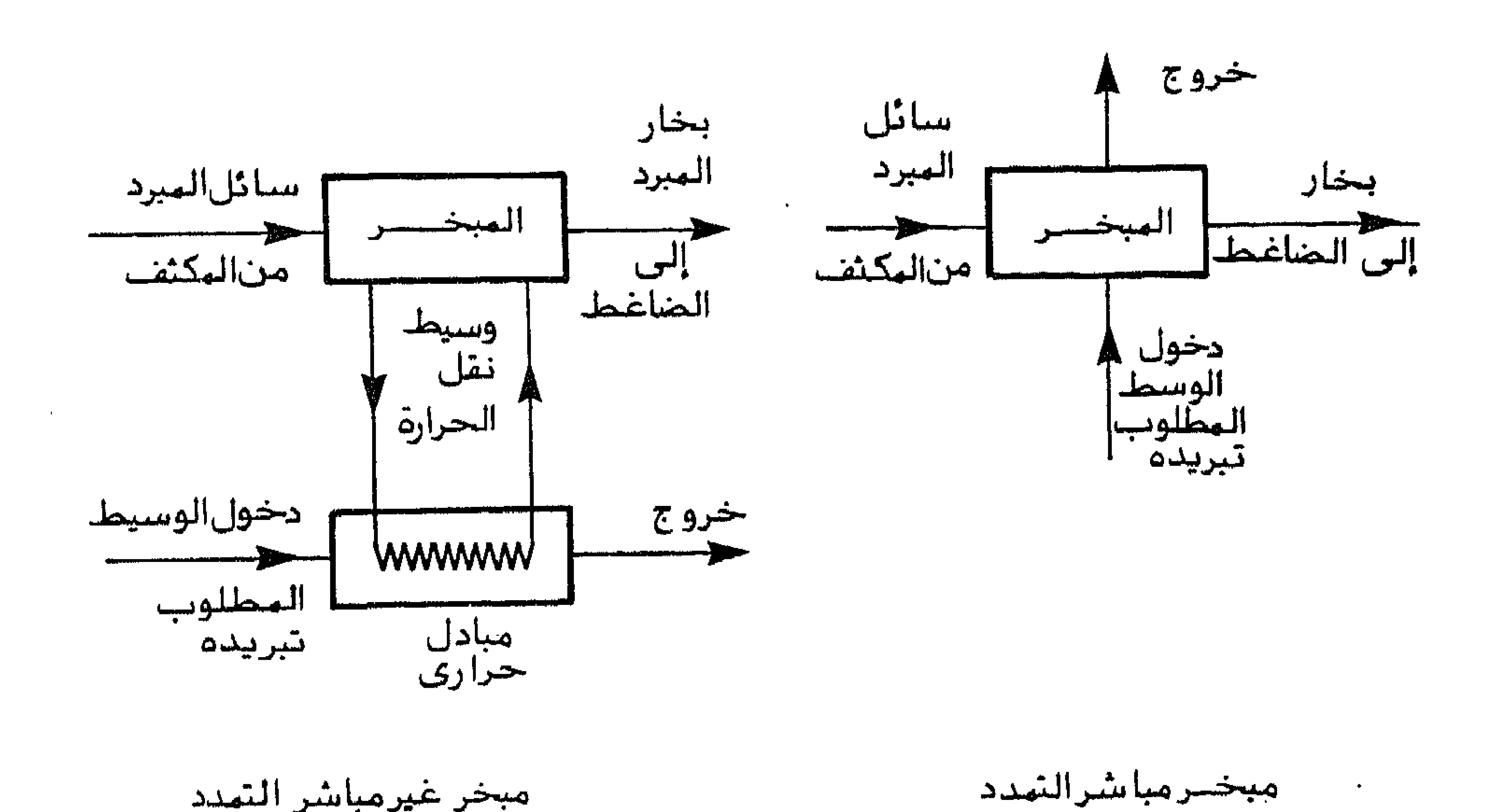
٣

المبخرات

٣.١ أهمية المبخرات وأنواعها

المبخر هو جزء دورة التبريد ، المسئول عن القيام بتبريد الحمل . ففي المبخر يتبخر المبرد (مائع التبريد) المستخدم في دورة التبريد ، مما يؤدي إلى سحب الحمل الحراري من المادة أو الوسط المطلوب تبريده . وبناء على ذلك يعتمد أداء دورة التبريد إلى حد كبير على كفاءة عملية انتقال الحرارة - خلال سطح المبخر - بين الوسط المطلوب تبريده ومبرد دورة التبريد .

وتقسم المبخرات تبعاً لعملية التبريد إلى مبخرات مباشرة التمدد ومبخرات غير مباشرة التمدد . ففي النوع الأول تتم عملية انتقال الحرارة بين المبرد والوسط خلال سطح المبخر كما هو موضح بشكل ١ . ٣ ، أما في النوع الثاني فيعمل المبخرعلى تبريد وسيط ما



شكل ٣.١ مبخرات مباشرة التمدد وغير مباشرة التمدد .

يعرف بوسيط نقل الحرارة ، ثم يقوم هذا الوسيط بتبريد الوسط أو المادة المطلوب تبريدها من خلال مبادل حراري ، كما هو موضح أيضاً بشكل ٣.١ . ومن تطبيقات النوع الأول وحدة الشباك لتكييف الهواء والثلاجات المنزلية حيث يبرد الهواء بتمريره مباشرة على المبخر . ومن أمثلة تطبيقات النوع الثاني نظم تكييف الهواء المركزية المستخدمة لماء بارد . وفي هذه النظم يبرد الماء بتمريره على المبخر ، ثم ينقل الماء المثلج إلى أماكن تكييف الهواء حيث يتم التبادل الحراري بين الماء والهواء ، لتبريد الهواء .

وهناك طرق أخرى لتقسيم المبخرات ، غير التقسيم السابق ، وتكون هذه التقسيمات تبعاً لطريقة تغذية المبرد إليها ، أو تبعاً لنوع الوسط المطلوب تبريده إن كان هواء أم سائلاً ، أو تبعاً لبنائها وتركيبها . وفي الأجزاء التالية سنعرض هذه التقسيمات بشيء من الإيجاز .

٣.٢ تقسيم المبخرات تبعاً لطريقة تغذية المُبَرِد إليها

تقسم المبخرات تبعاً لطريقة تغذية المُبَرِد إليها إلى أربعة أقسام :

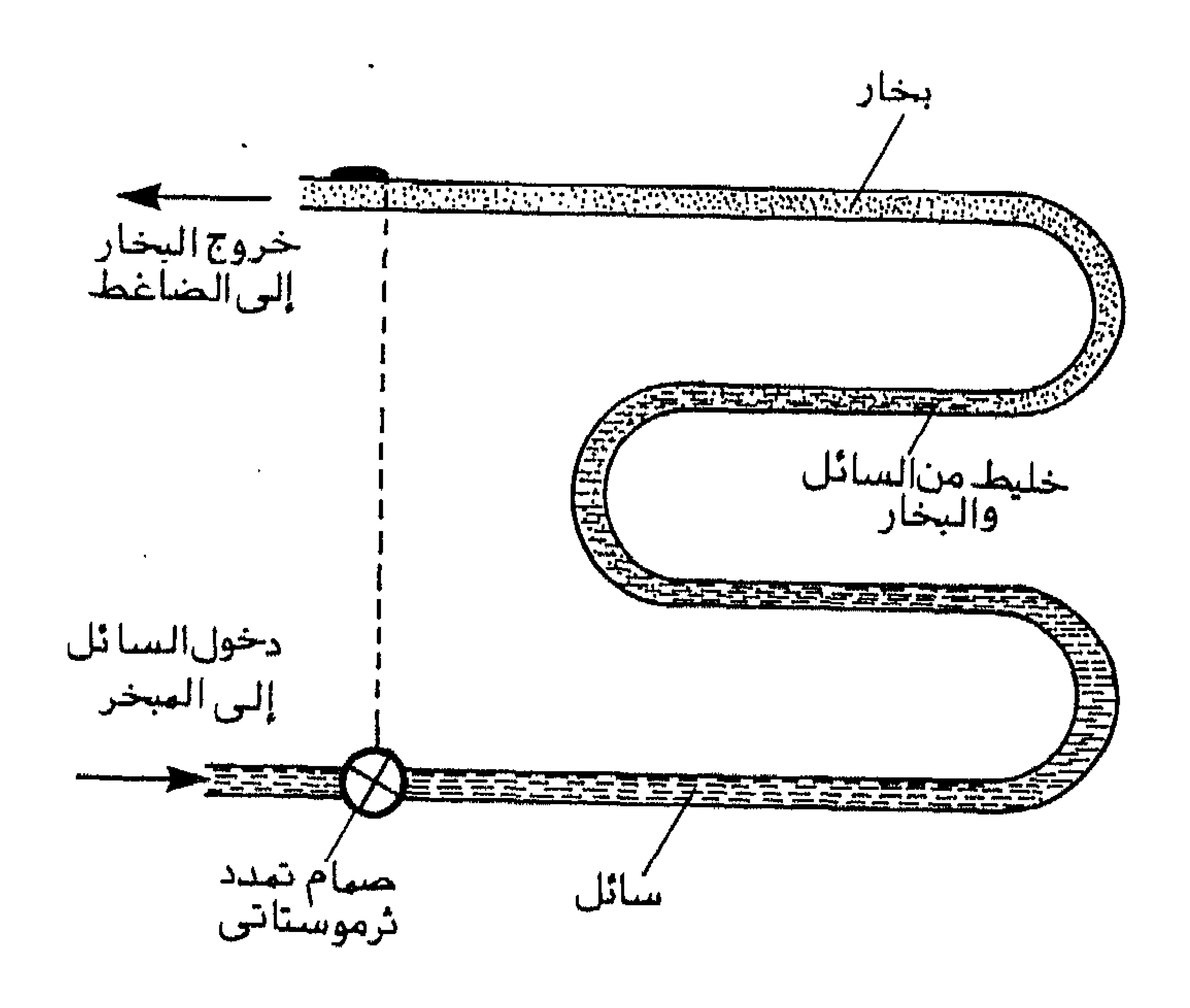
أ) مبخرات جافة التمدد

ب) مبخرات مغمورة الملف

جـ) مبخرات فائضة التغذية

د) مبخرات مغمورة الغلاف من نوع الغلاف والأنبوب .

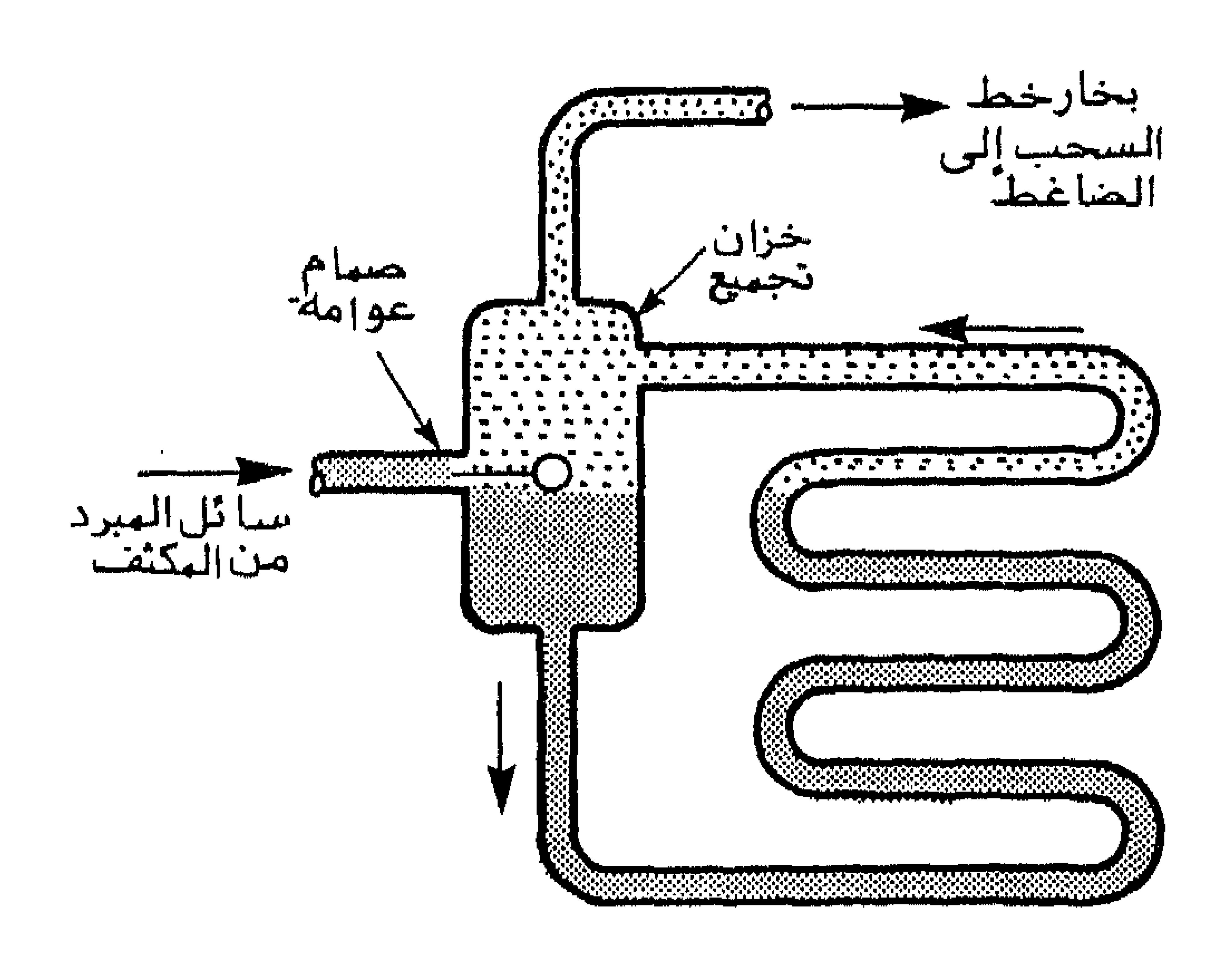
في النوع الأول من التقسيم السابق يسري سائل المبرد القادم من صمام التمدد إلى أنابيب المبخر بمعدل محدد تبعاً لحمل المبخر ، بحيث يتم تبخير سائل المبرد كلية قبل مغادرة المبخر إلى الضاغط . ويستخدم هذا النوع من المبخرات صمام تمدد ثرموستاتي للتحكم في



شكل ٢.٣ مبخر جاف التمدد .

معدل تغذية سائل المبرد إلى المبخر . ويبين شكل ٣.٢ مبخر جاف التمدد . وتستخدم هذه المبخرات في الثلاجات والمجمدات المنزلية وغيرها . ويلاحظ زيادة فقد الضغط كلما طالت أنابيب المبخر ، لذا يفضل استخدام عدة أنابيب بالمبخر لزيادة سطح انتقال الحرارة بدلاً من زيادة طول الأنابيب ، وينصح في هذه الحالة استخدام موزع بين المبخر وصمام التمدد لضمان عدالة توزيع سائل المبرد إلى أنابيب المبخر .

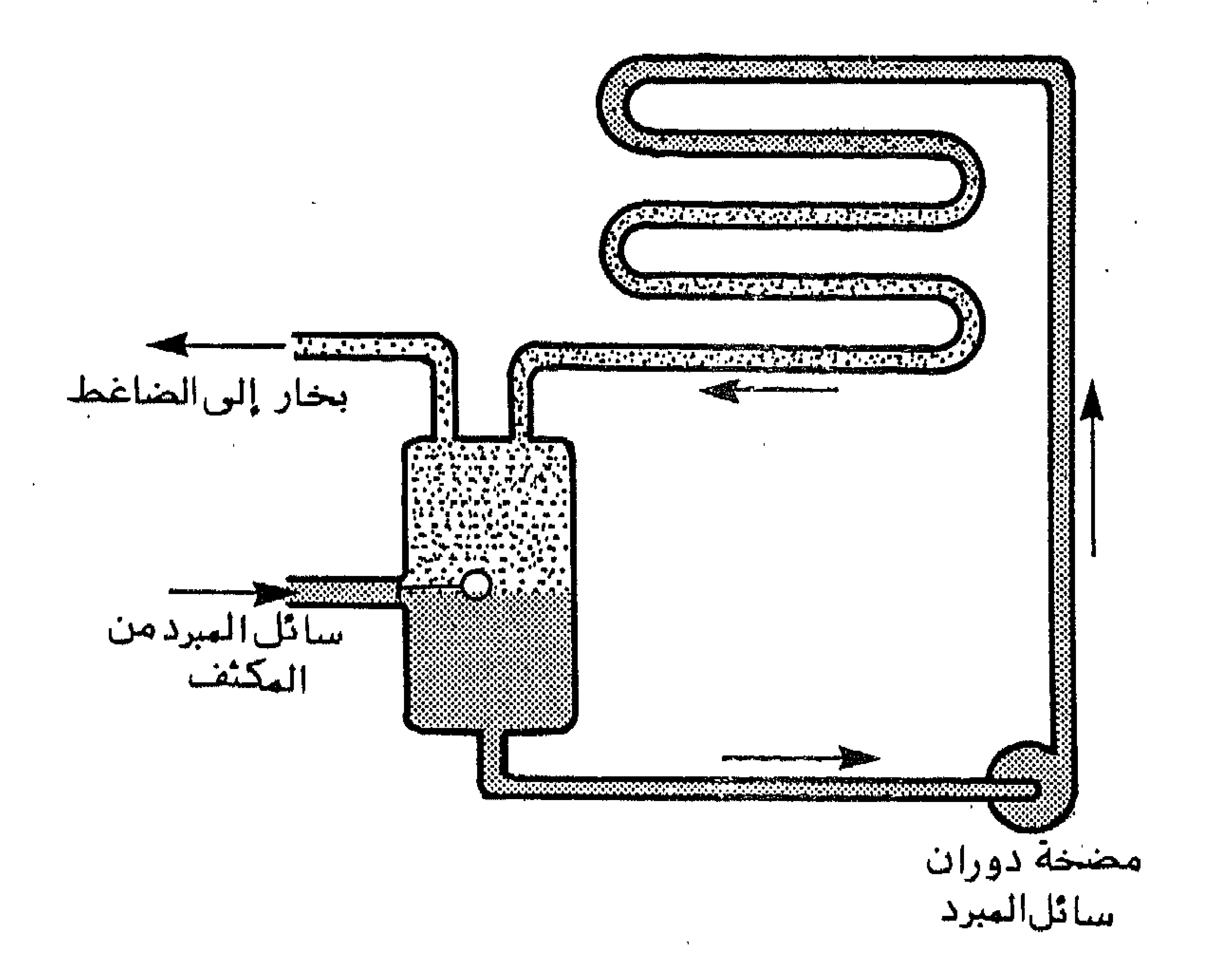
يعمل المبخر مغمور الملف دائماً بغمر ملفه بسائل المبرد كما هو موضح بشكل ٣.٣ . ويتطلب هذا الأداء استخدام صمام عوامة وخزان تجميع لسائل المبرد . ويعمل صمام العوامة على تثبيت مستوى سائل المبرد في الملف عند نفس مستوى السائل بخزان التجميع ، بغض النظر عن حمل التبريد . فإذا زاد حمل التبريد وتبخر سائل المبرد داخل الملف بمعدل مرتفع وانخفض مستوى السائل داخل الملف وبالتالي بالمستودع ، عمل صمام العوامة على زيادة سريان التبريد إلى خزان التجميع بالمعدل المناسب للمحافظة على مستوى سائل التبريد ثابتاً بالخزان .



شكل ٣.٣ مبخر مغمور الملف .

ويمتاز مبخر الملف المغمور عن مبخر التمدد الجاف ، بكفاءة انتقال الحرارة لوحدة المساحات من سطح الملف وذلك لارتفاع معامل انتقال الحرارة للسائل بالملف المغمور عنه بخليط السائل والبخار أو البخار فقط في ملف التمدد الجاف . ويعمل خزان التجميع بهذا النوع من المبخرات على تجميع قطرات السائل المصاحبة للبخار الخارج من الملف وفصلها عن البخار قبل مناولة هذا البخار إلى الضاغط ، مما يحمي الضاغط من دخول أي سائل إليه . ومن مميزاته الأخرى سهولة فصل زيت التزييت به ثم إرجاعه إلى الضاغط وذلك أيضاً بالمقارنة بمبخر التمدد الجاف . كما يمكن لمبخر الملف المغمور العمل عند فرق درجات حرارة – بين سائل المبرد داخل الملف وحمل التبريد خارجه – أصغر من تلك التي يمكن لمبخر التمدد الجاف العمل عندها ، مما يحسن أداء دورة التبريد ويوفر الطاقة . كما تمتاز هذه المبخرات أيضاً بانخفاض درجات حرارة تحميص البخار بخط سحب الضاغط مما يساعد على خفض درجة حرارة طرد الضاغط . ويؤدي هذا إلى حماية زيت التزييت من التحلل وحماية أنابيب المكثف من الانسداد وتكوين القشور . كما يمتاز هذا النوع من المبخرات بعدم دخول بخار المبرد الناتج عن عملية التمدد بصمام التمدد إلى المبخر وإنما سحبه مباشرة بالضاغط ، ويساعد هذا على خفض فقد الضغط لسريان المبرد خلال المبخر مما يؤدي إلى تحسن أداء دورة التبريد وتوفير الطاقة بها . ويعتبر ارتفاع تكلفة مبخر الملف المغمور بالمقارنة بمبخر التمدد الجاف من أهم عيوب هذا النوع من المبخرات ، ويرجع هذا الارتفاع في التكلفة إلى التكلفة الإضافية لاستخدام خزان تجميع وأنابيب توصيل هذا الخزان إلى دورة التبريد ، بالإضافة إلى شحنة المبرد الكبيرة نسبياً المطلوبة لهذا النوع من المبخرات .

وتستخدم مبخرات الملف المغمور في بعض التصميمات مضخة لدوران سائل المبرد خلال ملف المبخر مما يساعد على تحسين عملية انتقال الحرارة خلال سطح المبرد وخفض فرق درجة الحرارة بين سائل المبرد وحمل التبريد إلى حدها الأدنى ، ويحسن أداء دورة التبريد عامة . ويعرف المبخر في هذه التصميمات بالمبخر فائض التغذية . ويوضح

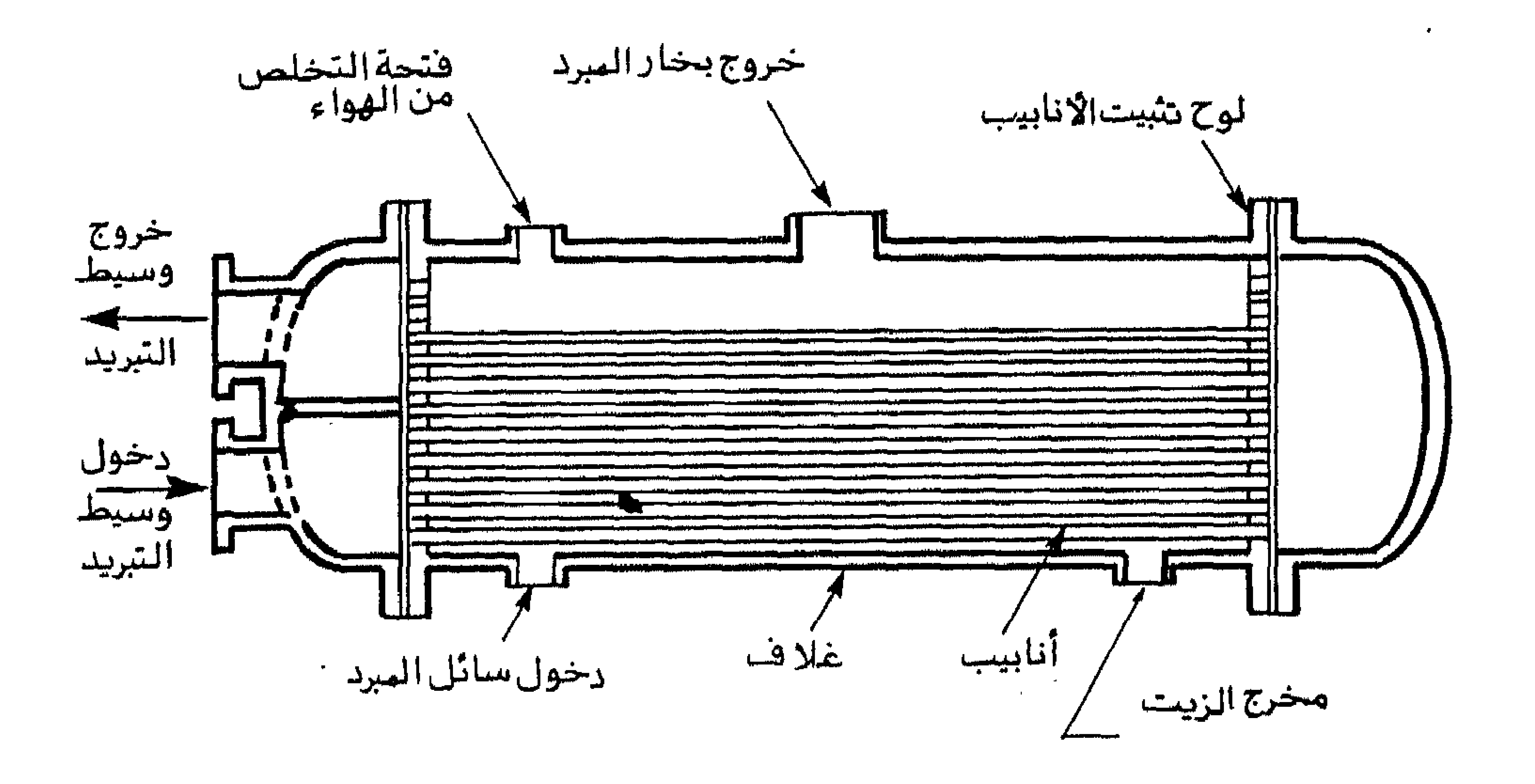


شكل ٤ . ٣ مبخر فائض التغذية .

شكل ٤ . ٣ رسماً تخطيطياً لأحد المبخرات . ولهذا النوع من المبخرات نفس المميزات الخاصة لمبخرات الملف المغمور بالإضافة إلى التحسن الملحوظ في انتقال الحرارة، ومن عيوبها ارتفاع التكلفة الناتجة عن استخدام خزان تجميع بوصلاته المختلفة ومضخة لدوران سائل المبرد والعزل الحراري اللازم لهذه المضخة والأنابيب المتصلة بها ، هذا بالإضافة إلى تكلفة الطاقة اللازمة لتشغيل المضخة وتكلفة صيانتها . ونتيجة لعنصر التكلفة تستخدم المبخرات فائضة التغذية في النظم الكبيرة فقط حيث يفوق الوفر في تحسين أداء دورة التبريد المستخدمة لهذه المبخرات ، التكلفة الإضافية لها والتي أوضحناها فيما سبق [أشراي ، ١٩٩٠] .

يعرف النوع الرابع للمبخرات تبعاً لطريقة التغذية بالمبخرات مغمورة الغلاف .

وهذه المبخرات عبارة عن مبادلات حرارية من نوع الغلاف والأنبوب ، يسري المبرد بها في الغلاف بينما يسري سائل حمل التبريد داخل الأنابيب ويغمر سائل المبرد الأنابيب حتى مستوى محدد بالغلاف . ويبين شكل ٣.٥ رسماً تخطيطياً لأحد هذه المبخرات . ويمتاز هذا النوع من المبخرات بنفس مميزات مبخر الملف المغمور ، إلا أن أعم عيوبه كبر شحنة سائل التبريد اللازمة لتشغيله . ولتحسين أداء هذا النوع من المبخرات يوضع في بعض التصميمات حواجز بالغلاف لتحسن سريان سائلا المبرد على الأنابيب مما يحسن عملية انتقال الحرارة . ويجب الا تزيد شحنة سائل التبريد بالغلاف عن حوالي ٧٠٪ من حجم الغلاف لضمان خروج البخار من الغلاف بدرجة جفاف مناسبة لسحب الضاغط . ويستخدم المبخر مغمور الغلاف عادة في سعات التبريد الكبيرة نسبياً ، ويعمل عادة مع ضواغط طرد مركزية [بيتا ، ١٩٨٤ ، والسيد وآخرون ١٩٨٨] .

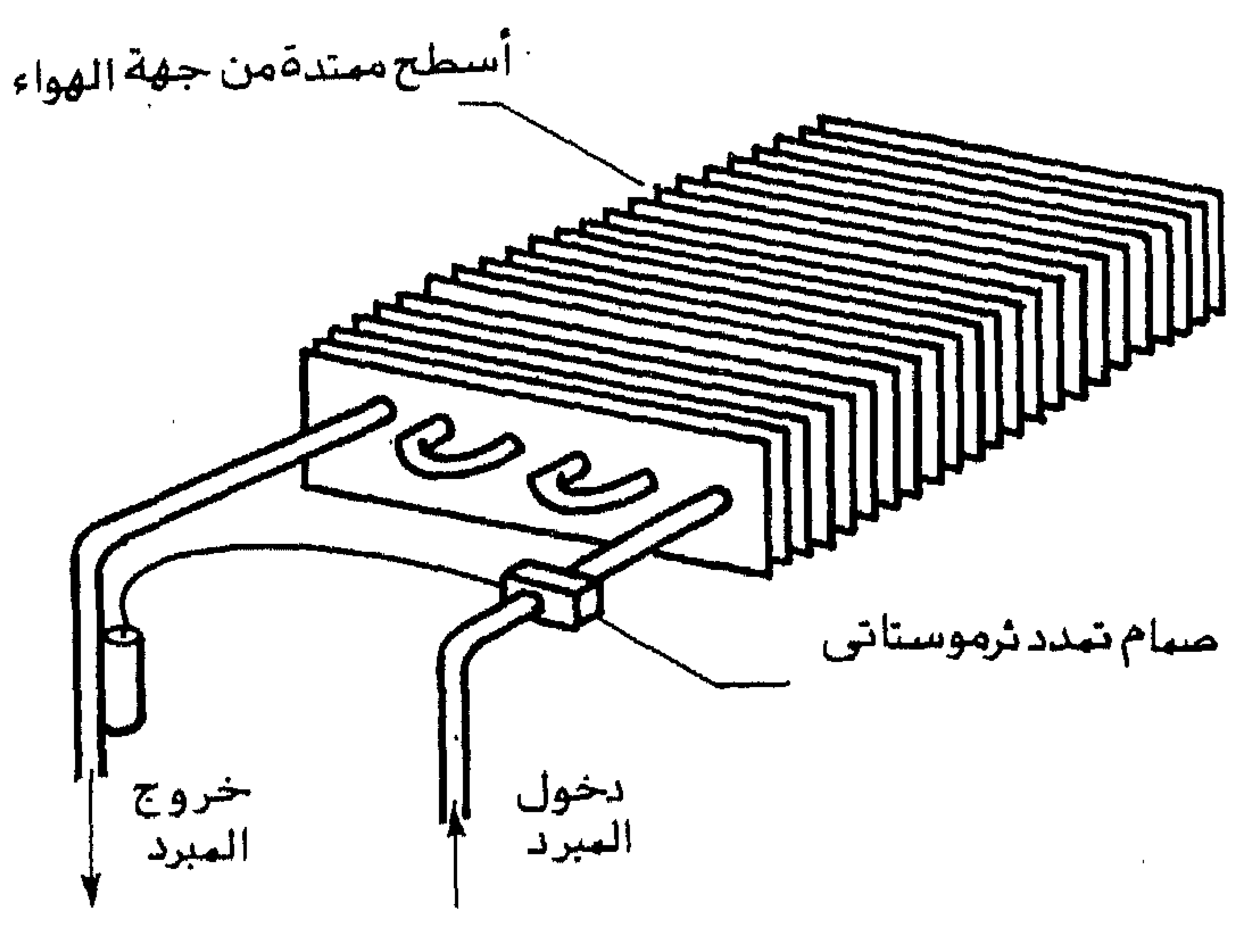


شكل ٣.٥ مبخر مغمور الغلاف من نوع الغلاف والأنبوب .

٣.٣ مبخرات تبريد الهواء (مبردات الهواء)

تقسم المبخرات تبعاً لنوع حمل التبريد إلى مبردات هواء ، حيث يكون حمل التبريد هواء ، أو مبردات سوائل حيث يكون حمل التبريد سائلاً .

تصنع المبخرات التي تعمل كمبردات هواء بعدة تصميمات ، ألا أن معظمها يكون عبارة عن أنابيب أو ممرات تحمل المبرد بداخلها ، ويتصل بها أسطح ممتدة (زعانف) (أنظر شكل ٣.٦) من الخارج ، ويلزم استخدام هذه الأسطح الممتدة حتى تعوض الزيادة في سطح انتقال الحرارة من جهة الهواء انخفاض قيمة معامل انتقال الحرارة للهواء بالمقارنة بقيمته لسائل المبرد داخل الأنابيب وممرات المبخر . وتعتمد المسافة بين الأسطح الممتدة وبعضها البعض على درجة حرارة الهواء المحيط بها . ففي حالة التطبيقات ذات درجة الحرارة المرتفعة نسبياً ، مثل تكييف الهواء ، حيث تكون درجة حرارة الهواء بين ٥ إلى ١٥ °م ، تكون كثافة الأسطح الممتدة المستخدمة حوالي ٤٨٠ إلى ٥٦٠ زعنفة في المتر .



شكل ٣.٦ مبخر لتبريد هواء (مبرد هواء) .

وبانخفاض درجة حرارة الهواء إلى تحت الصفر المئوي يقل عدد الزعانف إلى حوالي ٢٤٠ زعنفة في المتر . ويعزى هذا إلى تكوين الصقيع (الجليد) الناتج عن تجمد الماء المتكثف من بخار الماء في الهواء ، مما يقلل من مساحة سريان الهواء في الفراغات بين الزعانف ، وبالتالي يزيد فقد الضغط لسريان الهواء وتقل أيضاً سعة التبريد . لذا ، تستخدم هذه المبخرات عدداً من الزعانف يقل عن ١٦٠ زعنفة في تطبيقات درجة الحرارة المنخفضة .

وتعمل مبردات الهواء بطريقتين ، تبعاً لطريقة الحمل الحراري المستخدمة في عملية تبريد الهواء : إما بالحمل الحر (أي الطبيعي) أو الحمل القسري . ففي الطريقة الأولى يبرُد الهواء الملامس لسطح المبخر ، فتزيد كثافته ويسقط إلى أسفل مسبباً حركة الهواء مما يساعد على عملية التبريد . ومن أمثلة هذا النوع من المبخرات ، مبرد الهواء الموجود بالثلاجة المنزلية . وتشمل طريقة الحمل القسري ، مروحة تجبر الهواء على السريان على سطح انتقال الحرارة بالمبخر مما يحسن عملية تبريد الهواء إلى درجة كبيرة بالمقارنة بطريقة الحمل الحر ، ومن أمثلة هذه الطريقة وحدات الشباك لتكييف الهواء ، وبعض أنواع الثلاجات المنزلية الحديثة . وتقسم مبردات الهواء ذات الحمل القسري إلى ثلاثة أقسام تبعاً لسرعة الهواء المستخدم . في القسم الأول تقل سرعة الهواء عن ١٥متر/ث ، وتستخدم هذه المبردات في التطبيقات التي تحتاج إلى مستوى ضوضاء منخفض أو يخشى فيها من الجفاف مثل بعض غرف مخازن التبريد . وتتراوح سرعة الهواء في القسم الثاني بين ١٥متر/ث إلى ٣٥متر/ث ، مثل عمليات تكييف الهواء ومخازن التبريد للمواد الصلبة . وتصل سرعة الهواء في القسم الثالث من مبردات الهواء إلى حوالي ١٠٠متر/ث ، وتستخدم هذه السرعات العالية في التجميد السريع لحفظ الأغذية [بيتا ، ١٩٨٤] .

وتُستَخدم كل من المبخرات جافة التمدد والمبخرات مغمورة الملف لتبريد الهواء . وتعمل المبخرات جافة التمدد باستخدام كل من الأنبوب الشعري أو صمام التمدد

الثرموستاتي . ويستخدم الأنبوب الشعري في المبخرات صغيرة السعة وحتى حوالي ٣٥٠ كيلووات (١٠ طن تبريد) ، ومن أمثلة هذه الوحدات : وحدات الشباك لتكييف الهواء . أما المبخرات الكبيرة نسبياً في سعة التبريد فتستخدم صمام التمدد الثرموستاتي .

وتستخدم مبردات الهواء إما لتبريد الهواء أو لتجفيفه أو للغرضين معاً . وتصنع الأنابيب من النحاس عادة أما الزعانف (الأسطح الممتدة) فتصنع عادة من الألومنيوم ، إلا أن هناك بعض المبخرات التي تستخدم أنابيب نحاس مع زعانف نحاس وأنابيب ألومنيوم مع زعانف ألومنيوم [أشراي ، ١٩٨٨] .

٣.٤ مبخرات تبريد السوائل (المبردات)

تعرف المبخرات التي تقوم بتبريد السوائل بمبردات السوائل ، أو عامة بالمبردات. وتستخدم هذه المبردات في العديد من تطبيقات هندسة التبريد . وتقسم هذه المبردات تبعاً لبنائها إلى عدة أنواع من أهمها الآتي :

أ) مبرد الأنبوب والغلاف

ب) مبرد الأنبوب المزدوج

جـ) مبرد الخزان والملف

د) مبرد باديلوت

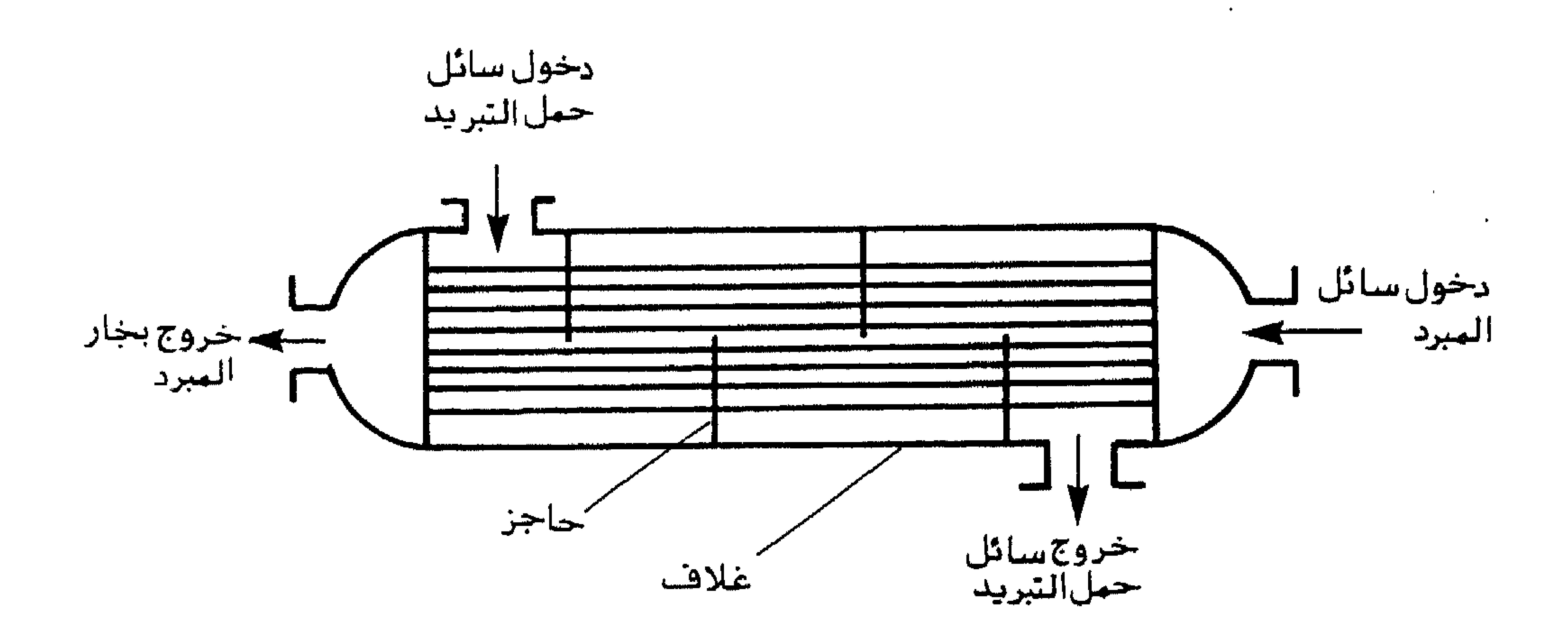
ويحوي كل من هذه الأنواع عدة تقسيمات أخرى تبعاً لتغذية سائل المبرد إليها وتبعاً لتغذية سائل حمل التبريد إليها ، وأيضاً تبعاً للشكل الهندسي لهذه المبردات .

يتكون مبرد الأنبوب والغلاف من غلاف يحوي عدة أنابيب ، ويوجد هذا النوع من المبخرات بقسميه : المبخر جاف التمدد والمبخر المغمور . في المبخر جاف التمدد ، يسري

سائل المبرد القادم من صمام التمدد إلى أنابيب المبخر حيث يكون سريانه في ممر واحد أو ممرين فأكثر تبعاً لتصميم المبخر . ويسري سائل حمل التبريد في الغلاف خارج الأنابيب ونظراً لوجود جزء من السطح الداخلي للأنابيب معرضاً للبخار ، فينصح عادة بوجود زعانف (أسطح ممتدة) على هذه الأسطح الداخلية للأنابيب ، وبإتجاه طولي . وتوضع حواجز بالغلاف لتوجيه سريان السائل حول الأنابيب ، وتحدد المسافة بين هذه الحواجز ، وطولها ، بحيث تكون سرعة سائل حمل التبريد ما بين ١متر/ث إلى ٢متر/ث مما يحسن من عملية انتقال الحرارة ويحد من عملية تآكل سطح الأنابيب الخارجي نتيجة السرعة العالية للسائل . ويبين شكل ٣.٧ رسماً تخطيطياً لمبخر جاف التمدد أحادي الممر .

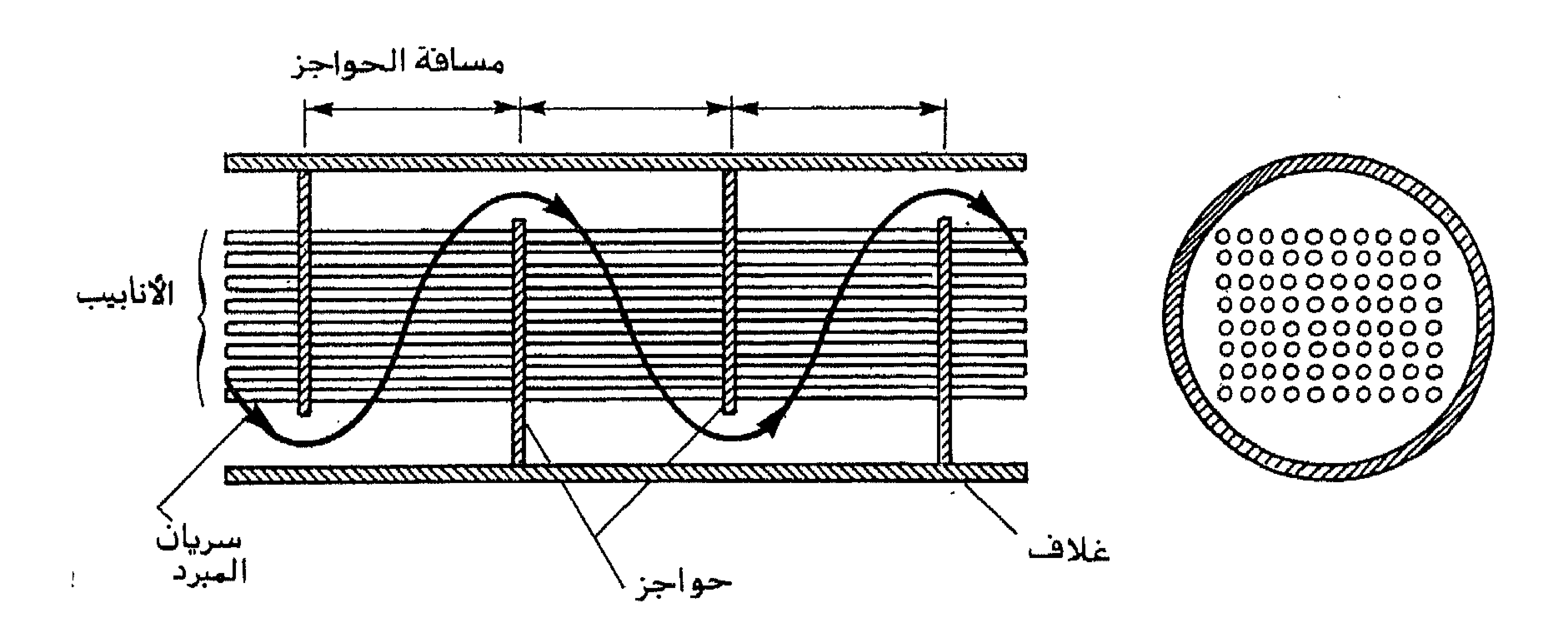
ويستخدم هذا النوع من المبخرات لتبريد السوائل بسعة تتراوح بين ٢ إلى ٣٥٠ طن تبريد (أي من ٧ إلى ١٢٢٠ كيلووات تبريد) . ويصاحب هذه المبخرات عادة ضواغط موجبة الإزاحة وخاصة الضواغط الترددية والدورانية [أشراي ، ١٩٨٨] .

تستخدم المبخرات مغمورة الغلاف بكثرة لتبريد السوائل . في هذه الحالة يسري

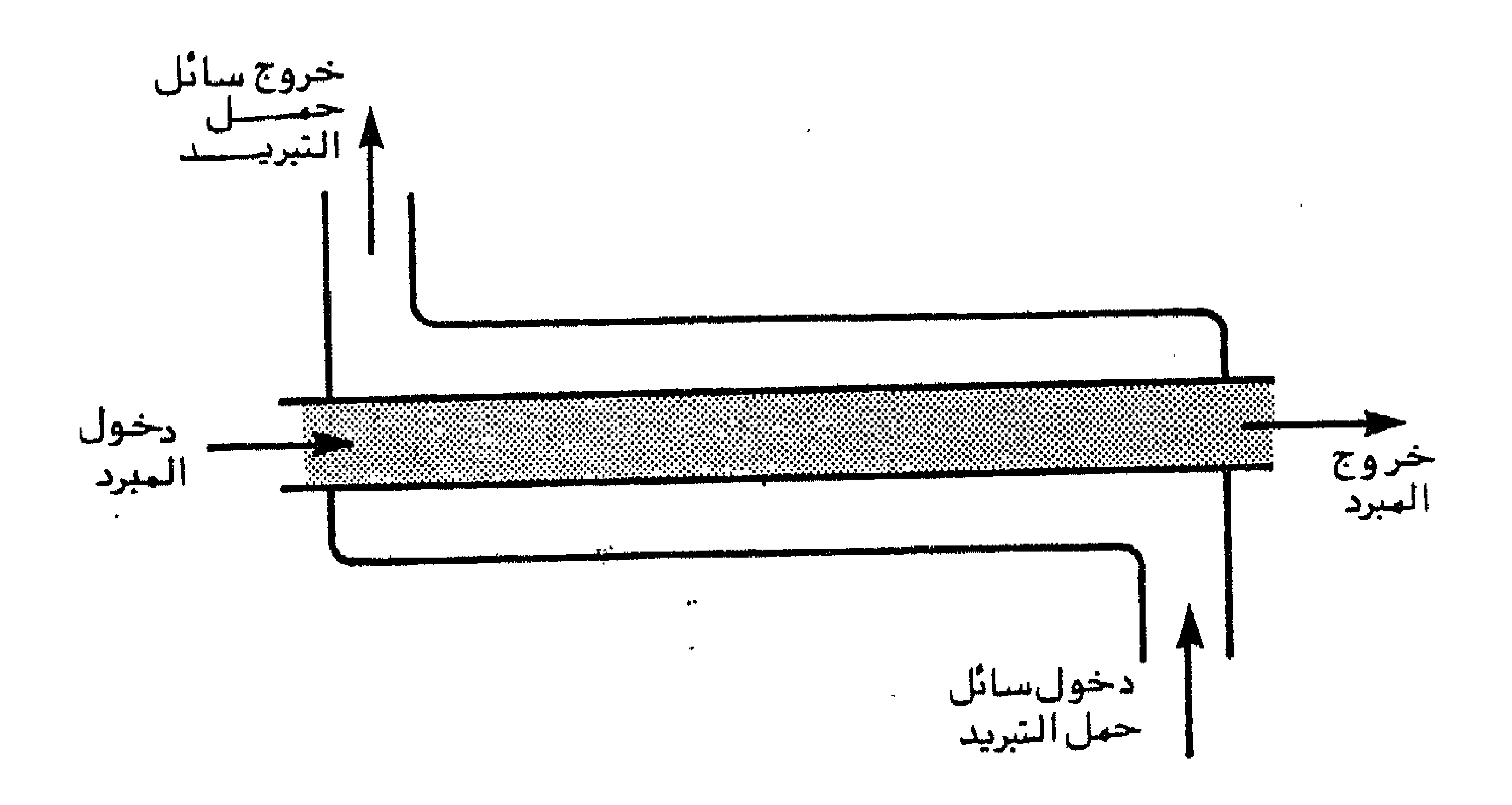


شكل ٣.٧ مبرد الغلاف والأنبوب (مبخر جاف التمدد) ، أحادي الممر .

سائل حمل التبريد داخل الأنابيب بينما تغمر الأسطح الخارجية للأنابيب بسائل المبرد الموجود بالغلاف . ويلزم في هذه الحالة ترك فراغ لا يقل عن حوالي ٣٠٪ من حجم الغلاف لفصل قطرات سائل المبرد المصاحبة للبخار المسحوب إلى الضاغط . وقد يلزم الأمر في بعض التصميمات إلى تركيب مرشح خاص لهذا الغرض . ويحسب عدد الأنابيب المستخدمة في هذه المبخرات وعدد المسارات بها بحيث تكون سرعة سائل حمل التبريد داخل الأنابيب ما بين ١متر/ث إلى ٤متر/ث مما يحسن عملية انتقال الحرارة دون التضحية بفقد ضغط مرتفع . وتوضع أيضاً في بعض الأحيان ، مثل المبخرات المستخدمة لمبرد ١٢ ومبرد ٢٢ ، زعانف (أسطح ممتدة) على الأسطح الخارجية للأنابيب من جهة الغلاف لتحسين عملية انتقال الحرارة . ويوضح شكل ٣.٨ رسماً تخطيطياً لبعض المبخرات المغمورة لتبريد السوائل . وتستخدم هذه المبخرات عادة مع الضواغط اللولبية وضواغط الطرد المركزي وبسعة تبريد تتراوح بين ٢٥ إلى ٢٠٠٠ طن تبريد ، أي حوالي ٨٨ إلى ٧٠٠٠ كيلووات تبريد . ويلزم عند تشغيل هذا النوع من المبردات عدم استخدامه في التطبيقات التي يتجمد فيها سائل حمل التبريد داخل الأنابيب مما قد يعرضها للتلف .



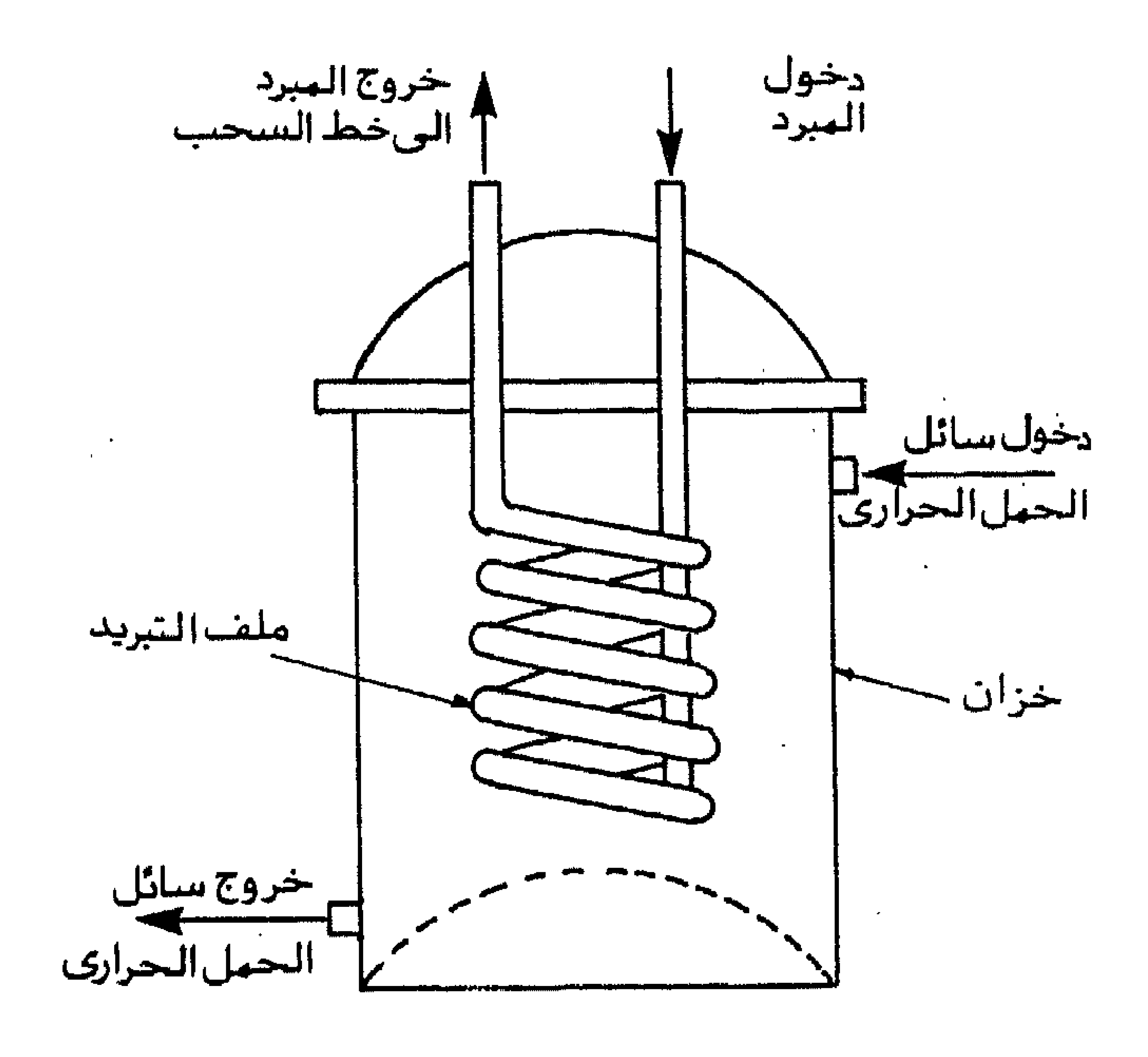
شكل ٣.٨ مبرد الغلاف والأنبوب (مبخر مغمور الغلاف) .



شكل ٣.٩ مبرد الأنبوب المزدوج .

يتكون مبرد الأنبوب المزدوج من أنبوبين أحدهما داخل الأخرى ، يسري سائل المبرد في الأنبوب الداخلي (أو في الحيز الحلقي بين الأنبوبين) ويسري سائل حمل التبريد الحيز الحلقي بين الأنبوبين (أو داخل الأنبوب الداخلي) في اتجاه معاكس لاتجاه سريان سائل المبرد. وتركيب هذا النوع من المبخرات بسيط وسهل التشغيل ، الا أنه يصعب فيه الوصول إلى السطح الداخلي للأنبوب أو الحيز الحلقي . ويستخدم هذا النوع من المبخرات في عدة تطبيقات أهمها تبريد زيت البترول ، وتبريد مياه الشرب . ويبين شكل ٣.٩ رسماً تخطيطياً لأحد هذه المبخرات .

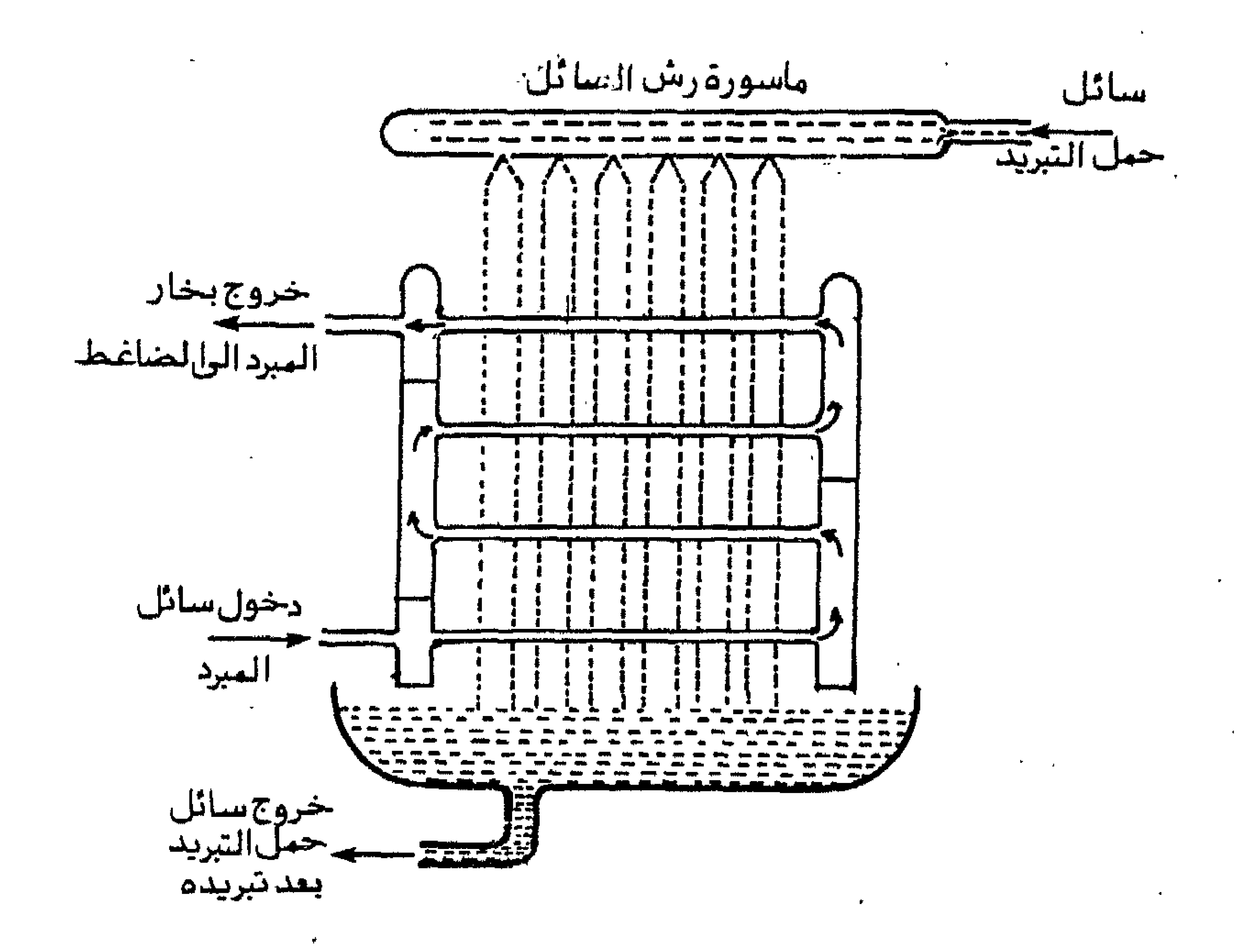
يتكون مبرد الخزان والملف ، كما هومبين بشكل ٣.١٠ ، من خزان وملف حلزوني الشكل . يسري سائل المبرد عادة داخل الملف ، بينما يحفظ سائل حمل التبريد بالخزان خارج الملف . ويستخدم قلاب أو مضخة تقليب في معظم الأحيان لتدوير وخلط سائل حمل التبريد لتحسين عملية انتقال الحرارة . ويفضل استخدام هذا النوع من المبخرات في التطبيقات ذات سعة التبريد البسيطة مثل تبريد المياه والمشروبات والعصائر في محلات



شكل ٣.١٠ مبرد الخزان والملف .

وكافتيريات خدمة الجمهور . كما يستخدم أيضاً في بعض الصناعات ذات الطبيعة المتغيرة في حمل التبريد حيث يستفاد من الخزان في تخزين البرودة في سائل حمل التبريد لاستخدامها في حالة الذروة لحمل التبريد [دوسنات ، ١٩٨١] .

يستخدم مبرد باديلوت في الصناعات الغذائية التي تحتاج تبريد سوائل بالقرب من درجة حرارة التجمد ، ولكن دون تجميدها ، مثل تثليج الحليب ومنتجات الألبان . وفي هذه المبخرات يسري سائل المبرد داخل أنابيب أفقية بينما يرش سائل حمل التبريد من فوقها ، فيسري إلى أسفل بتأثير الجاذبية الأرضية ، فيجمع أسفل الأنابيب كما هو موضح بشكل ٣.١١ . وتستخدم هذه الأنواع عادة المبخرات مغمورة الملف عند استخدام الأمونيا ، والمبخرات جافة التمدد عند إستخدام مبرد ١٢ ومبرد ٢٢ والأمونيا ، [أشراي ، ١٩٨٨ ، براساد ١٩٨٣] .



شكل ٣.١١ مبرد باديلوت (Baudelot) .

٣.٥ شروط تصميم المبخرات والمواد التي تستخدم في تصنيعها

هناك عدة شروط يلزم مراعاتها عند تصميم المبخر بغض النظر لنوع التطبيق أو نوع المبخر المستخدم مع التطبيق ، وفي الأجزاء التالية نعرض أهم هذه الشروط .

يجب أن يعمل سطح انتقال الحرارة بالمبخر بكفاءة عالية ما أمكن ، لذا تُخْتَار مواد تصنيع المبخرات من مواد جيدة التوصيل الحراري مثل المعادن . ويجب مراعاة ألا

تتفاعل المواد المستخدمة لبناء المبخر مع المبرد أو المائع المراد تبريده . وتستخدم نظم التبريد المستخدمة للهالوكربونات النحاس وسبائكه والألومنيوم وسبائكه والحديد وسبائكه دون تفرقة ، إلا أنه يجب مراعاة ألا تزيد نسبة المنجنيز في سبائك الألومنيوم - إذا استخدمت لتصنيع المبخرات - عن ٢٪ إذا كان هناك احتمال وجود ماء بالقرب من الأسطح [أشراي ، ١٩٨٨] . وتستخدم نظم الأمونيا أيضاً الألومنيوم وسبائكه وإن كان الشائع بهذه النظم استخدام الصلب الكربوني والحديد ، ولايوصى باستخدام النحاس أو سبائكه لتفاعله مع الأمونيا في وجود الماء . كما يجب مراعاة عدم تآكل مادة المبخر في وجود المائع المراد تبريده . فمثلاً ، عند تبريد مياه ملحة ، كمياه البحر أو مياه بعض الآبار الملحة ، يلزم معالجة هذا الماء كيميائياً قبل تبريده ، حيث يتفاعل الألومنيوم والحديد والنحاس وسبائكهم عادة مع الماء الملح .

يلزم أيضاً عند تصميم المبخرات أن تكون خفيفة الوزن وصغيرة الحجم ، ومتينة وسهلة الصيانة . كما يجب أن يكون فقد الضغط لسريان المبرد خلال المبخر أقل ما يمكن لضمان أداء دورة التبريد بكفاءة مرتفعة . أيضاً يجب أن يكون فقد الضغط في السريان المراد تبريده أقل ما يمكن توفيراً للطاقة ، وأن تكون سرعة هذا السريان أيضاً مرتفعة ما أمكن لتحسين عملية انتقال الحرارة . لذا يجب أن يراعى عند تصميم مبردات الهواء التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة (مما يسبب تكون صقيع على أسطح انتقال الحرارة بالمبخر) كبر المسافات بين زعانف سطح المبخر لمنع انسداد سطح المبخر كلية بالصقيع ، ويلزم أيضاً وجود وسيلة لإذابة هذا الجليد دورياً كلما زاد مقداره عن حد السماح للتصميم .

ويجب أن تزود مبردات السوائل (المبردات) عند تصميمها بوسيلة لمنع تجمد السائل المراد تبريده ، حيث يسبب التجمد - إذا حدث - تلفاً كبيراً بأسطح انتقال الحرارة بالمبخر . ويستخدم لهذا الغرض ، عادة ، أحدى طريقتين : المحافظة على ضغط التشبع للمبرد أعلى من الضغط المناظر لدرجة حرارة تجمد السائل المراد تبريده ، أو ايقاف

الضاغط إذا انخفضت درجة حرارة السائل عن حد السماح . ويؤخذ حد السماح للسائل عادة حوالي ٥° م أعلى من درجة حرارة التجمد للسائل .

ويجب أيضاً عند تصميم المبخرات اتخاذ الاحتياطات اللازمة لعودة زيت تزييت الضاغط المحمول بالمبرد إلى الضاغط ، ويحدث هذا في معظم نظم الهالوكربونات دون نظم الأمونيا حيث أن الأمونيا غير قابلة للخلط مع زيت التزييت . لذا يلزم عند التصميم ألا تقل سرعة بخار المبرد في أنابيب المبخر عن الحد اللازم لحمل زيت التزييت معه . كما يجب أن يحوي التصميم الوسائل الكافية لإرجاع هذا الزيت إلى الضاغط . وتحوي المبخرات المغمورة بأسفلها فتحة لإرجاع زيت التزييت المخلوط بسائل المبرد إلى الضاغط دورياً للمحافظة على مقدار الزيت الموجود بالضاغط لحمايته من التلف .

ولحماية الضاغط من التلف يلزم عند تصميم المبخر مراعاة عدم خروج سائل المبرد من المبخر إلى خط سحب الضاغط . ويستخدم لذلك عدة وسائل منها استخدام صمام تمدد ثرموستاتي لضمان خروج بخار المبرد من المبخر بقدر كافي من درجات التحميص ، أو استخدام فاصل قطرات السائل ، أو تركيب خزان تجميع يوضع بعد المبخر في حالة استخدام المبخرات المغمورة . كما يجب أيضاً مراعاة عزل المبخر حرارياً ، مع وضع مانع تسرب بخار فوق هذا العازل ، إذا قلت درجة حرارة المبخر عن درجة حرارة نقطة الندى للهواء المحيط بالمبخر ، وذلك لمنع تكثف بخار الماء الموجود بالهواء المحيط على سطح المبخر.

٣.٦ الحمل الحراري لمبردات السوائل

تستخدم مبردات السوائل إما لتبريد سائل كمنتج نهائي ، كما هو الحال في تبريد الماء لأغراض الشرب ، أو تبريد المشروبات والعصائر في الصناعات الغذائية

والكافيتريات والمطاعم ، أو لتبريد سائل يستخدم كوسيط يُنقّل عبر مواسير لتبريد منتج نهائي وذلك مثل مبردات الماء الذي يتم توزيعه لتبريد الهواء في تطبيقات تكييف الهواء، أو تبريد محلول ملح لاستخدامه في صناعات غذائية مثل تجميد اللحوم والأسماك وفي صناعة الألبان وغيرها . وفي جميع الأحوال يحسب الحمل الحراري للمبخر كما يلي

$$Q = \dot{m}\ C_p\ (\ T_i - T_o) \qquad (3.1)$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان سائل حمل التبريد خلال المبخر ، و C_p هي الحرارة النوعية للسائل و T_i و T_o هما على التوالي درجتا حرارة دخول وخروج سائل حمل التبريد إلى ومن المبخر .

ويعتبر الماء أكثر السوائل استخداماً كحمل تبريد مباشر للمبخر . ويرجع هذا إلى توفر الماء وانخفاض تكلفته بالإضافة إلى تفوق خصائصه الحرارية على الخصائص الحرارية للسوائل الأخرى . ونظراً لتجمد الماء عند درجة الصفر المئوي ، فإنه لا يمكن استخدامه في التطبيقات التي تقل درجة حرارتها عن الصفر المئوي . عندئذ تستخدم المحاليل الملحة أو محاليل مانعات التجمد.

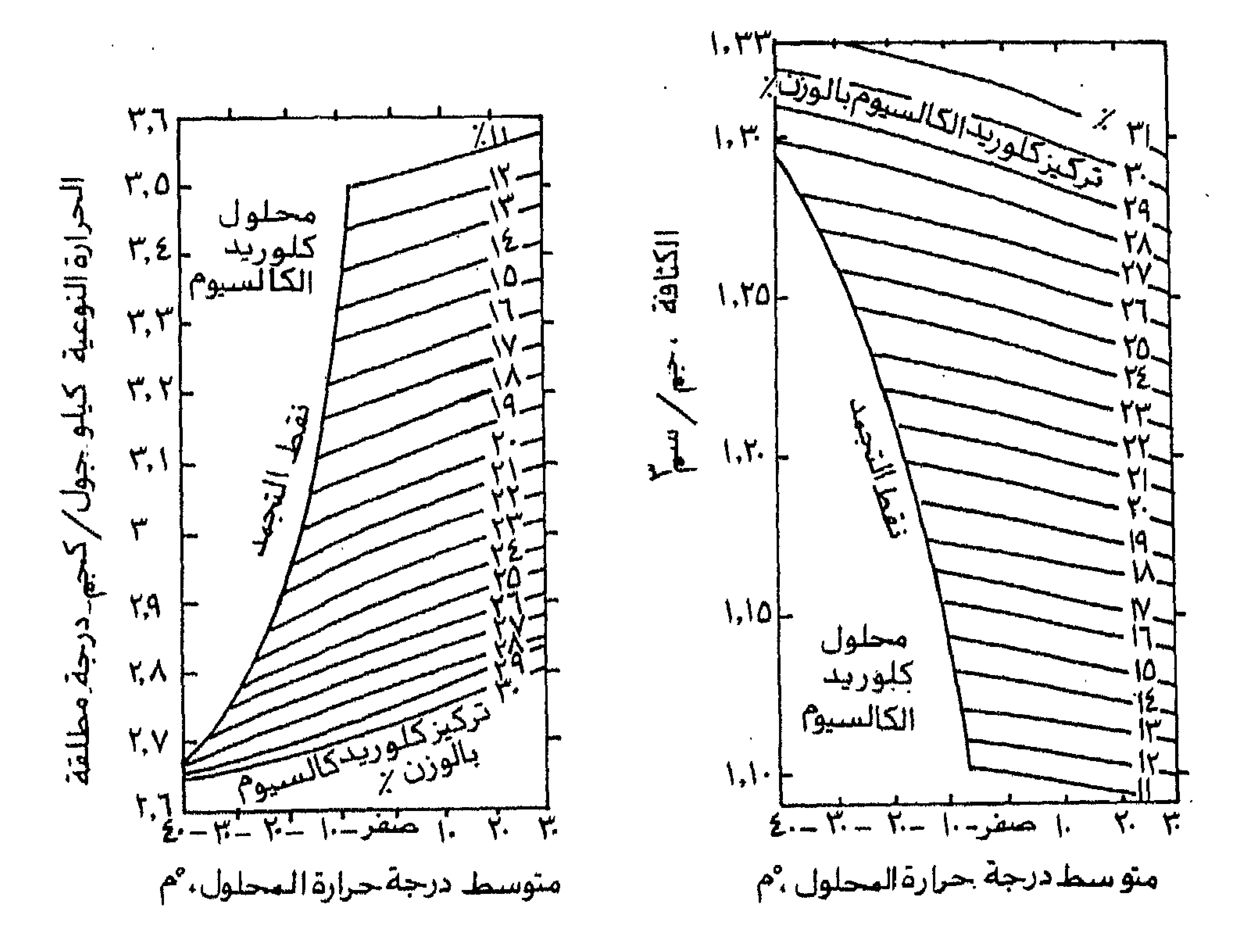
يتكون المحلول الملح من ملح مذاب في ماء مما يؤدي إلى تغير خواص المحلول بالمقارنة بالماء . فبزيادة تركيز الملح في المحلول تنخفض درجة حرارة بدء التجمد للمحلول حتى يصل التركيز إلى التركيز الحرج الذي تبدأ عنده درجة حرارة التجمد في الارتفاع مرة أخرى بزيادة تركيز الملح ، وتعرف المحاليل الملحية التي تخضع لهذا التصرف بمحاليل يوتيكتية . ومن أهم الأملاح المستخدمة لهذا الغرض في تطبيقات التبريد ملح كلوريد الكالسيوم وملح كلوريد الصوديوم . ويبين جدول ٣.١ تغير درجة حرارة بدء التجمد لمحلولي هذين الملحين مع النسبة المئوية للتركيز (بالوزن) . ويلاحظ من الجدول إمكانية

جدول ٣.١ درجة حرارة بدء التجمد لتركيزات مختلفة من أملاح كلوريد الكالسيوم وكلوريد الصوديوم ، ولمانعي التجمد چليكول الإثيلين وچليكول البروبيلين في الماء [آشراي ١٩٨٩ ، ودوسات ١٩٨١] .

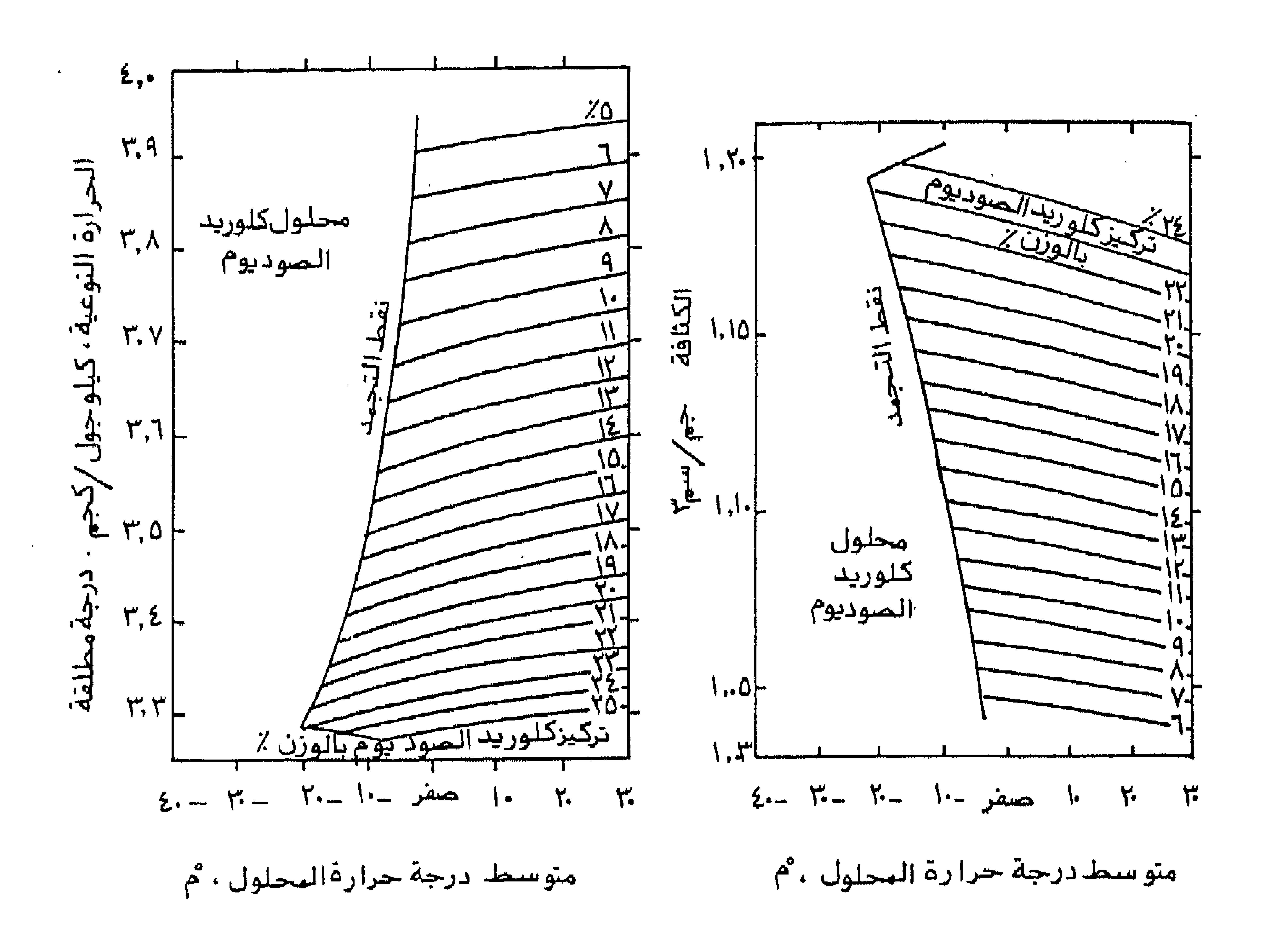
كلوريد الكالسيوم		كلوريد الصوديوم		چليكول الإثيلين		چليكول البروبيلين	
نسبة التركيز بالوزن (٪)	درجة حرارة بدء التجمد م°	نسبة التركيز بالوزن (٪)	درجة حرارة بدء التجمد م°	نسبة التركيز بالوزن (٪)	درجة حرارة بدء التجمد م°	نسبة التركيز بالوزن (٪)	درجة حرارة بدء التجمد م°
صفر	صفر	صفر	صفر	١٥	-٥.٣	٥	-١.٧
٥	-٢.٤	٥	-٢.٨	٢٠	-٨.٨	١٠	-٣.٣
١٠	-٥.٤	١٠	-٦.٤	٢٥	-١٢.٢	١٥	-٥.٣
١٥	-١٠.٣	١٥	-١١.١	٣٠	-١٥.٨	٢٠	-٧.٢
٢٠	-١٨	٢٠	-١٦.٨	٣٥	-٢٠	٢٥	-٩.٥
٢٥	-٢٩.٤	٢٣	-٢١.١	٤٠	-٢٤.٧	٣٠	-١٢.٨
٢٩.٨٧	-٥٥	٢٥	-٨.٨	٤٥	-٣٠	٣٥	-١٦.٤
٣٠	-٤٦			٥٠	-٣٥.٨	٤٠	-٢٠.٨
						٤٥	-٢٦.١
						٥٠	-٣١.٩
						٥٥	-٣٩.٨
						٥٩	-٤٩.٤

استخدام محلول كلوريد الصوديوم في التطبيقات التي لا تقل درجة الحرارة المطلوبة عن -٢١.١ °م ، أما محلول كلوريد الكالسيوم فيمكن استخدامه في تطبيقات حتى درجة -٥٥ °م . ويبين شكلي ٣.١٢ و ٣.١٣ تغير الكثافة والحرارة النوعية مع درجة الحرارة والنسبة المئوية للتركيز (بالوزن) لمحلولي كلوريد الكالسيوم وكلوريد الصوديوم، على التوالي.

ويستخدم محلول كلوريد الكالسيوم عادة في التطبيقات التي لا تحتاج تلامس مباشر مع الأطعمة والمواد الغذائية لما يضيفه هذا المحلول إلى الأغذية من تغير في المذاق ،

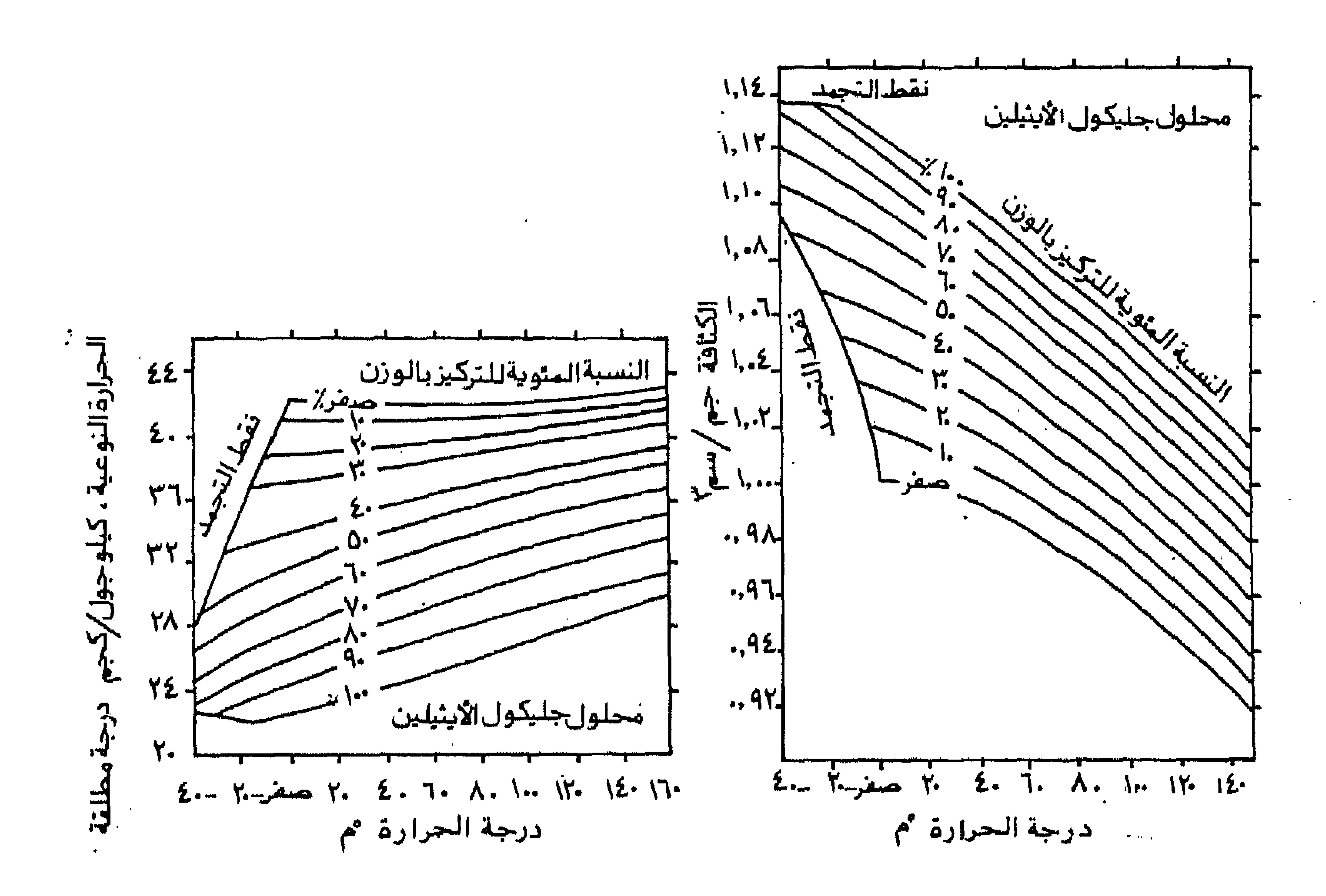


شكل ٣.١٢ تغير الكثافة والحرارة النوعية مع درجة الحرارة والتركيز لمحلول كلوريد الكالسيوم [الاشراي،١٩٨٩].



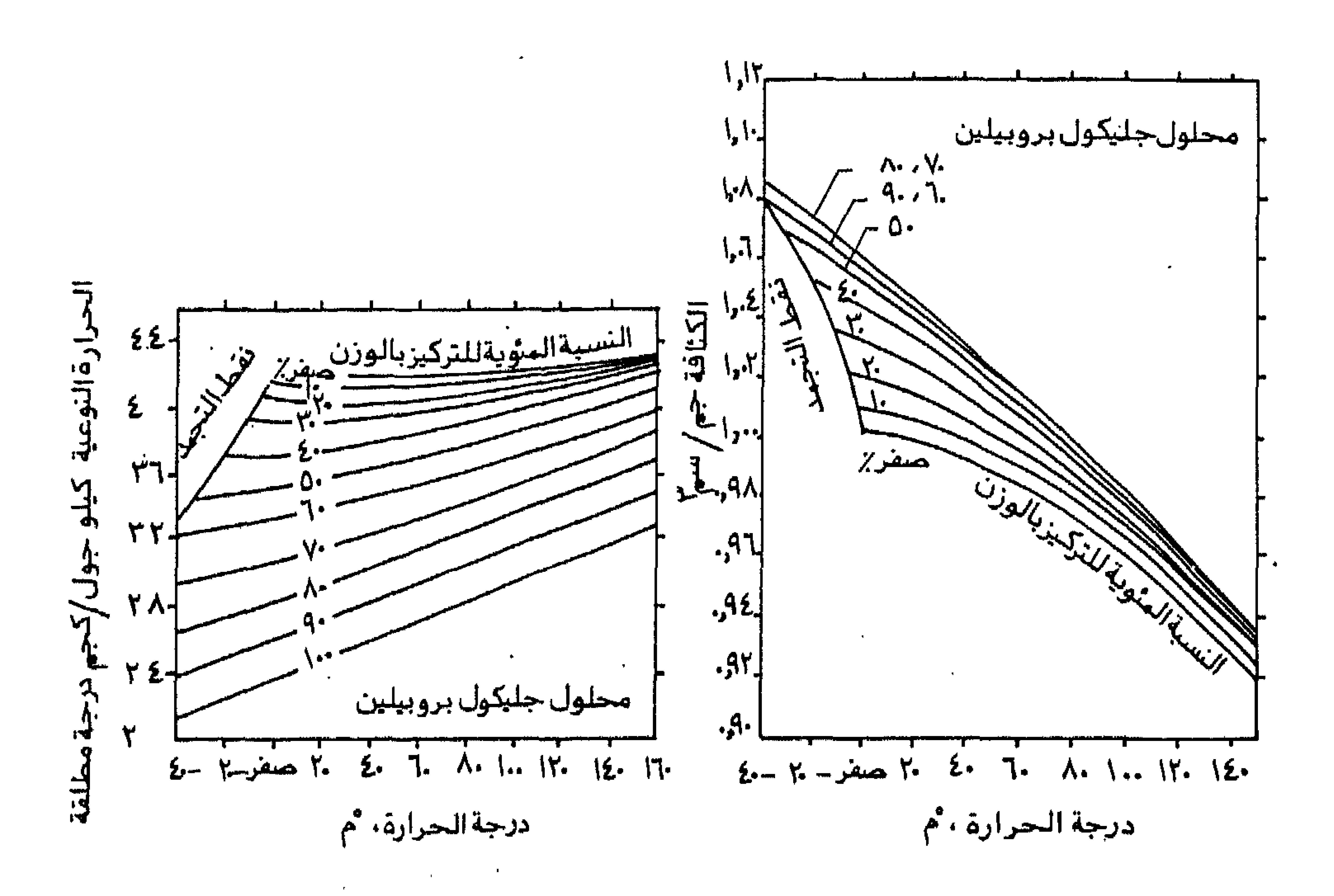
شكل ٣.١٣ تغير الكثافة والحرارة النوعية مع درجة الحرارة والتركيز لمحلول كلوريد الصوديوم [الأشراي،١٩٨٩].

وذلك خلافاً لمحلول كلوريد الصوديوم (ملح الطعام العادي) الذي لا يترك أي أثر في المذاق ، لذا يستخدم محلول كلوريد الصوديوم في العديد من الصناعات الغذائية . ويعتبر التآكل من أهم المشاكل المصاحبة لاستخدام المحاليل كوسيط تبريد بين المبخر والحمل الحراري ، إلا أن هذه المشكلة يمكن التغلب عليها عادة بإضافة مانع تآكل مثل كرومات الصوديوم . ويلزم الكشف الدوري على الرقم الهيدروجيني للمحلول للتأكد من وجوده بين ٧ و ٨,٥ لضمان الحد من التآكل .



شكل ٣.١٤ تغير الكثافة والحرارة النوعية مع درجة الحرارة والتركيز لمحلول مانع التجمد جليكول الإيثلين في الماء [الاشراي، ١٩٨٩].

من أهم مانعات التجمد المستخدمة في تطبيقات التبريد جليكول الإثيلين وجليكول البروبيلين . وتمتاز محاليل هاتين المادتين بانخفاض تطايرها وانخفاض درجة حرارة بدء تجمدها (أنظر جدول ٣.١) بالإضافة إلى الانخفاض النسبي لقدرتها على تشجيع التآكل عندما يضاف إليها بعض الكيماويات . وتتفوق الخواص الحرارية لمحلول جليكول الإثيلين عامة بالمقارنة بالخواص الحرارية لمحلول جليكول البروبيلين ، خاصة عند درجات الحرارة المنخفضة . إلا أن أهم عيوب محلول جليكول الإيثيلين هو كونه سام مما يحد من



شكل ٣.١٥ تغير الكثافة والحرارة النوعية مع درجة الحرارة والتركيز لمحلول مانع التجمد جليكول البروبيلين في الماء [الأشراي، ١٩٨٩] .

استعماله في التطبيقات التي قد تكون قريبة من الإنسان ، عندئذ يفضل استخدام محلول جليكول البروبيلين . ويبين شكلي ٣.١٤ و ٣.١٥ تغير الكثافة والحرارة النوعية مع درجة الحرارة والنسبة المئوية للتركيز (بالوزن) لمحلولي جليكول الإثيلين وجليكول البروبيلين .

مثال ٣.١

يتطلب أحد التطبيقات حمل حراري قدره ٥٠ كيلووات تبريد ، احسب معدل سريان الحجم المطلوب عند استخدام

أ) محلول كلوريد الكالسيوم بتركيز قدره ٢٣ ٪ بالوزن

ب) محلول كلوريد الصوديوم بتركيز قدره ٢٣ ٪ بالوزن

جـ) محلول جليكول الإيثلين بتركيز قدره ٤٠ ٪ بالوزن

د) محلول جليكول البروبيلين بتركيز قدره ٤٠ ٪ بالوزن

وذلك بفرض أن درجة حرارة المحلول عند الدخول إلى المبخر تساوي – ١٠° م ، وعند الخروج منه تساوي – ١٥° م .

الحل

متوسط درجة حرارة المحلول = $\frac{-١٥ - ١٠}{٢}$ = – ١٢,٥° م

من الأشكال ٣.١٢ إلى ٣.١٥ نجد الكثافة والحرارة النوعية للمحاليل الأربعة عند – ١٢.٥° م و والتركيزات المعطاه عاليه . يُحْسَب معدل سريان الحجم (باللتر/ث) من معادلة ٣.١ كما يلي

$$50 \times 1000 = \rho \frac{\dot{V}}{1000} C_p (-10 + 15)$$

جدول ٣.٢ ملخص نتائج حسابات مثال ٣.١

المحلول	ρ كجم / م^3	C_p جول/كجم . ° م	$\dot{V}$ (لتر/ث)
محلول كلوريد الكالسيوم	١٢٣٠	٢٩٠٠	٢.٨٠
محلول كلوريد الصوديوم	١١٨٨	٣٣٠٠	٢.٥٥
محلول جليكول الإيثلين	١٠٦٨	٣٣٠٠	٢.٨٤
محلول جليكول البروبيلين	١٠٥٠	٣٧٢٠	٢.٥٦

ويبين جدول ٢.٣ ملخص نتائج المثال . ويتضح من الجدول أن محلولي كلوريد الصوديوم وچليكول البروبيلين يحتاجان أقل معدل سريان حجم .

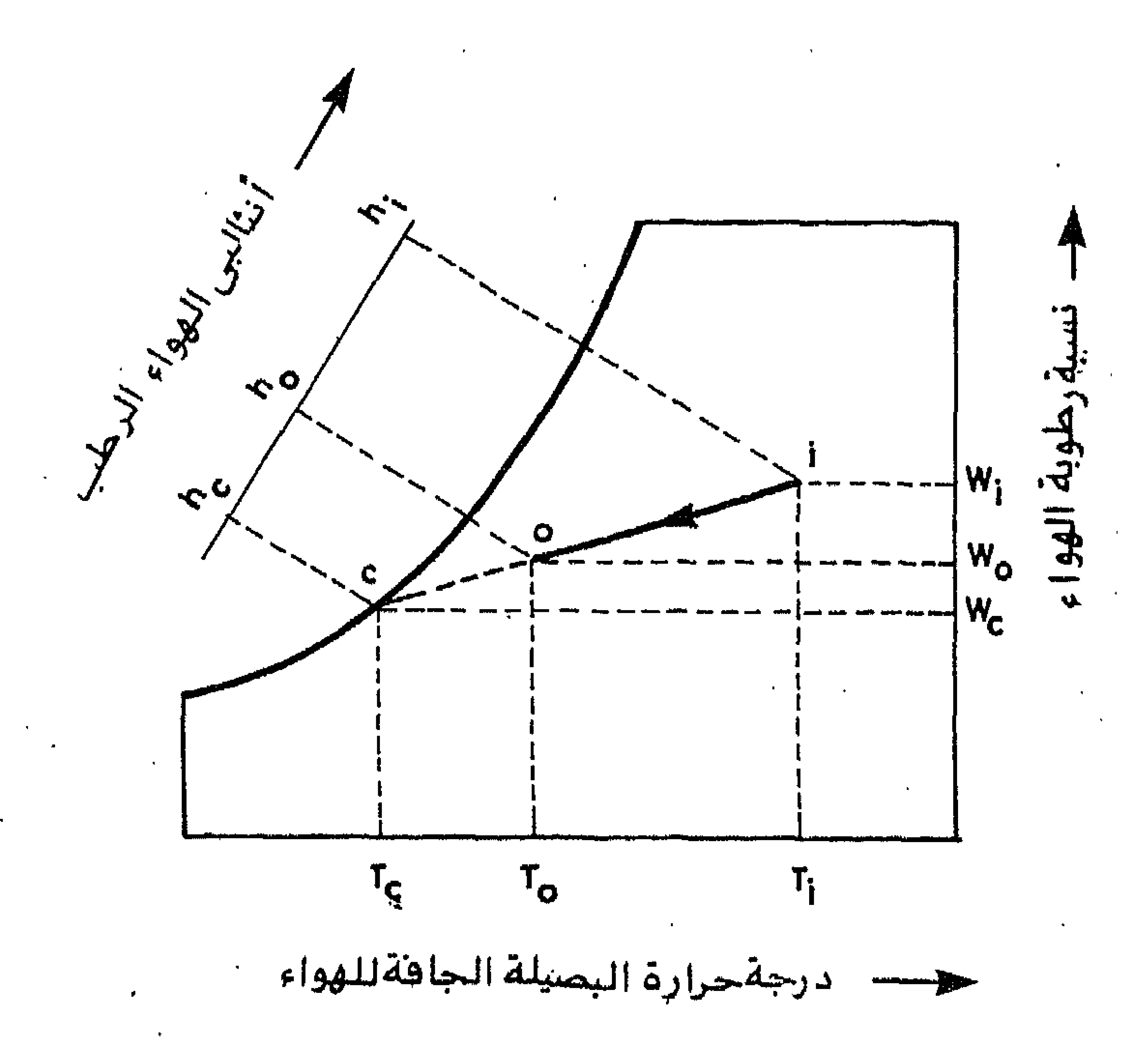
٣.٧ الحمل الحراري لمبردات الهواء

تُسْتَخدم مبردات الهواء لتبريد الهواء ، أو لتبريد الهواء ونزع رطوبته . وتتحكم درجة الحرارة المؤثرة لسطح المبخر في هذه العملية . فإذا قلت هذه الدرجة عن درجة حرارة نقطة الندى كان هناك نزع رطوبة للهواء بالإضافة إلى تبريده . أما إذا تساوت هذه الدرجة مع درجة حرارة نقطة الندى للهواء أو زادت عنها ، كان تبريد الهواء دون نزع رطوبته .

بتمرير هواء عند الحالة i بدرجة حرارة بصيلة جافة T_i ونسبة رطوبة W_i على سطح المبخر ، يلامس معظم الهواء سطح المبخر فيتم تبريده ونزع رطوبته إلى الحالة c بدرجة حرارة قدرها T_c ونسبة رطوبة W_c . أما الجزء الباقي الذي لم يلامس سطح المبخر فإنه يبقى عند نفس ظروف الدخول إلى المبخر أي عند الحالة i . وتعرف نسبة هذا الجزء إلى إجمالي الهواء المار خلال المبخر بعامل التجنيب BF . وبخلط جزئي الهواء المارين خلال المبخر ، أي الملامس لسطح المبخر وغير الملامس له ، يخرج الهواء من المبخر عند الحالة o كما هو مبين بشكل ٣.١٦ . عندئذ يحسب عامل التجنيب من الشكل كما يلي

$$BF = \frac{h_o - h_c}{h_i - h_c} = \frac{T_o - T_c}{T_i - T_c} \simeq \frac{W_o - W_c}{W_i - W_c} \tag{3.2}$$

حيث h هي إنثالبي الهواء الرطب . وتعرف درجة حرارة للنقطة c بأنها درجة الحرارة المؤثرة لسطح المبخر أو درجة حرارة نقطة الندى للجهاز .



شكل ٣.١٦ رسم عملية تبريد الهواء ونزع رطوبته عند المرور على سطح المبخر.

يحسب حمل تبريد الهواء من شكل ٣.١٦ كما يلي

$$Q = \dot{m}_a \, (h_i - h_o)$$

$$= \rho_a \dot{V}_a \, (h_i - h_o) \qquad (3.3)$$

حيث ρ_a هي كثافة الهواء و $\dot{V}_a$ هي معدل سريان حجم الهواء خلال المبخر ، و $\dot{m}_a$ هي معدل سريان كتلة الهواء الجاف خلال المبخر . أيضاً يمكن كتابة المعادلة ٣.٣ في الصورة الآتية

$$Q = \dot{m}_a \, C_{pa} \, (T_i - T_o) + \dot{m}_a \, h_{fg} \, (W_i - W_o) \qquad (3.4)$$

حيث C_{pa} هي الحرارة النوعية للهواء الرطب و h_{fg} هي الحرارة الكامنة لتبخير الماء . ويمثل الحد الأول في الطرف الأيمن الحرارة النوعية للحمل الحراري ، بينما يمثل الحد الثاني في الطرف الأيمن الحرارة الكامنة للحمل الحراري . ويمكن أيضاً أن تكتب المعادلة ٣.٤ في الصورة الآتية

$$Q = \dot{m}_a (1 + 1.805\, W_o)(T_i - T_o) + 2501\, \dot{m}_a (W_i - W_o) \tag{3.5}$$

حيث m بوحدات كجم/ث ، T بالدرجة المئوية ، و W بالكجم ماء/ كجم هواء جاف ، و Q بالكيلووات .

مثال ٣.٢

مطلوب تبريد هواء ونزع رطوبته من درجة حرارة قدرها ٣٢ ° م ونسبة رطوبة ٠.٠١٥ كجم ماء/كجم هواء جاف إلى ١٤° م . إذا كان معدل سريان الهواء خلال المبخر هو ١.٢ كجم/ث ، وعامل التجنيب لسطح المبخر هو ٠.١٥ ، احسب :

أ) درجة حرارة نقطة الندى للجهاز في المبخر المطلوب استخدامه

ب) الحمل الحراري المحسوس ، والحمل الحراري الكامن ، والحمل الحراري الكلي .

الحل

أ) من معادلة ٣.٢ نجد درجة حرارة نقطة الندى للجهاز كما يلي

$$0.15 = \frac{14 - T_c}{32 - T_c}\ , \qquad T_c = 10.82 \quad ^\circ C$$

أي أن درجة حرارة نقطة الندى للجهاز = ١٠.٨٢ ° م

ب) بوضع حالة الدخول إلى المبخر ونقطة الندى للجهاز على خريطة السيكرومتري للهواء (ملحق أ) ، نجد نسبة رطوبة الهواء الخارج من المبخر بدلالة درجة حرارة الخروج . أي أن نسبة رطوبة الهواء الخارج من المبخر = ٠.٠٠٩ كجم ماء/كجم هواء جاف.
ومن معادلة ٣.٥ يحسب الحمل الحراري المحسوس كما يلي

$$Q_s = 1.2 \times (1 + 1.805 \times 0.009)\ (32 - 10.82) = 25.83 \quad kW$$

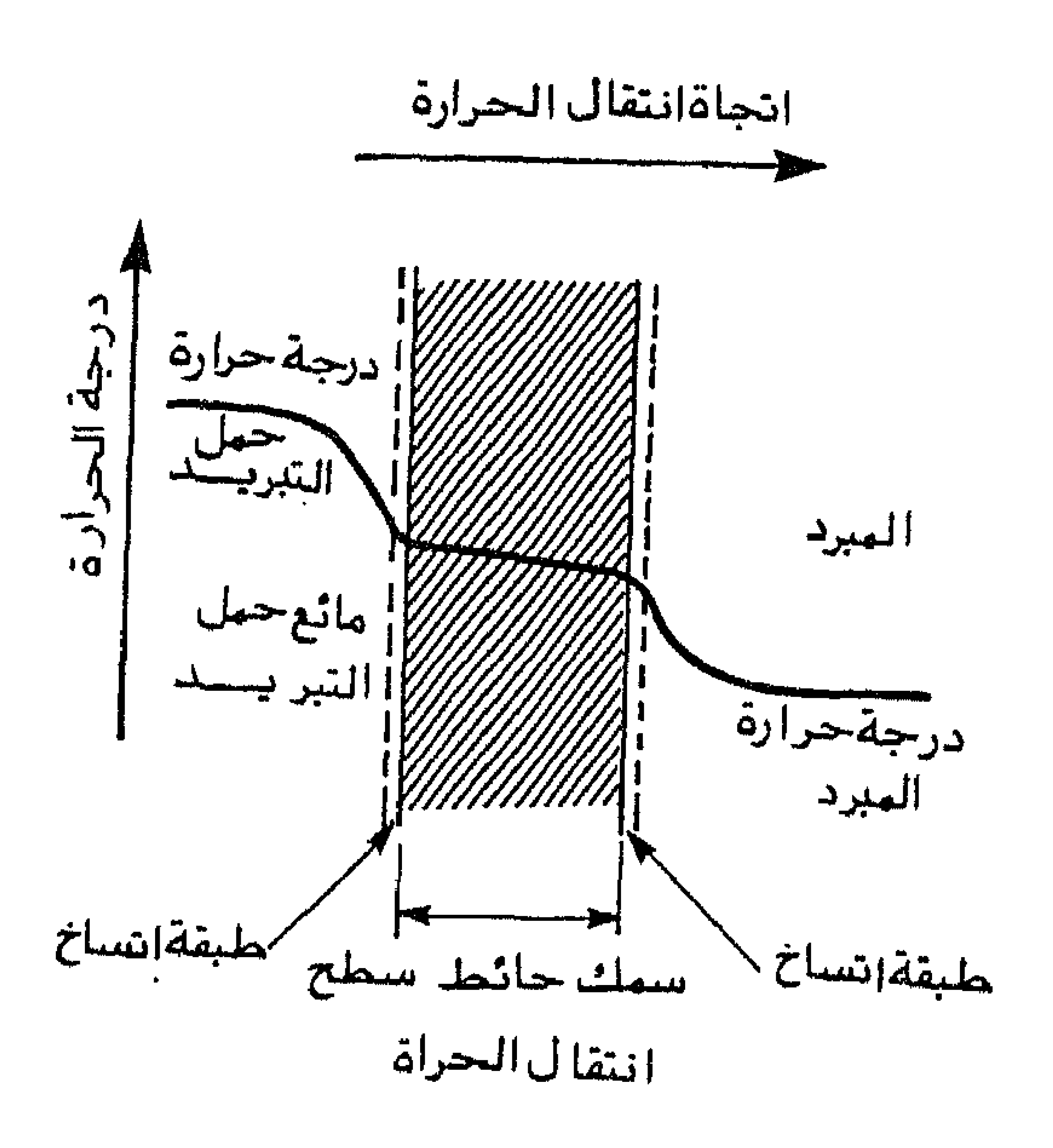
ويحسب الحمل الحراري الكامن كما يلي

$$Q_L = 1.2 \times 2501\ (0.015 - 0.009) = 18.0 \quad kW$$

ويكون إجمالي الحمل الحراري هو ٤٣.٨٣ كيلووات.

٣.٨ انتقال الحرارة في المبخرات

يفصل سطح انتقال الحرارة بالمبخر بين المبرد عند درجة حرارة منخفضة ومائع حمل التبريد عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً ، ويكون توزيع درجة الحرارة خلال السطح كما هو مبين بشكل ٣.١٧ . تنتقل الحرارة بالحمل الحر أو القسري إلى سطح المبخر (الخارجي أو الداخلي) . ويسبب الوسخ الذي قد يوجد على سطح المبخر مقاومة لانتقال الحرارة ، ويظهر هذا الوسخ نتيجة لعدم نقاء وسيط الحمل الحراري ووجود العديد من الشوائب العالقة به ، مثلاً قد تتكون طبقة من الأتربة على سطح انتقال الحرارة عند استخدام الهواء كحمل حراري . أيضاً يسبب استخدام الماء غير النقي وجود طبقة من الشوائب على سطح انتقال الحرارة . ويسبب استخدام الماء الملحي تآكل سطح انتقال الحرارة وترسيب طبقة من الأملاح عليه ، مما يؤدي إلى خفض معدل انتقال الحرارة خلال السطح . تنتقل الحرارة بعدئذ خلال حائط مادة المبخر ومنها إلى المبرد بالحمل القسري أو الحر تبعاً لتصميم المبخر . وفي بعض التصميمات قد تتكون طبقة رقيقة من زيت التزييت المحمول من الضاغط بالمبرد إلى المبخر ، وتمثل طبقة الزيت هذه طبقة اتساخ



شكل ٣.١٧ انتقال الحرارة خلال سطح المبخر.

تعمل أيضاً على خفض معدل انتقال الحرارة خلال سطح المبخر .

يقدر المعامل الكلي لانتقال الحرارة خلال سطح المبخر مسنداً إلى السطح الداخلي لانتقال الحرارة كما يلي

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + r_{fi} + \frac{t}{k}\frac{A_i}{A_m} + r_{fo}\frac{A_i}{A_o} + \frac{1}{h_o}\frac{A_i}{A_o} \quad (3.6)$$

حيث يمثل كل حد في الطرف الأيمن المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة في كل طبقة من الطبقات بشكل ٣.١٧ . وبالإسناد إلى سطح انتقال الحرارة الخارجي ، يقدر المعامل الكلي لانتقال الحرارة كما يلي

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_i}\frac{A_o}{A_i} + r_{fi}\frac{A_o}{A_i} + \frac{t}{k}\frac{A_o}{A_m} + r_{fo} + \frac{1}{h_o} \quad (3.7)$$

حيث h_i و h_o هما معاملا انتقال الحرارة بالحمل على السطح الداخلي والخارجي للمبخر على التوالي ، و r_{fi} هي مقاومة اتساخ السطح الداخلي مسندة إلى السطح الداخلي ، و r_{fo} هي مقاومة اتساخ السطح الخارجي مسندة إلى السطح الخارجي ، و t هي سمك جدار المبخر ، و k هي معامل التوصيل الحراري خلال جدار المبخر ، و A_i و A_o و A_m هم على التوالي السطح الداخلي والخارجي والمتوسط لانتقال الحرارة .

تعرف سعة تبريد المبخر Q بأنها معدل الحرارة التي تنتقل خلال سطح المبخر بين المبرد والحمل الحراري . وتعطى سعة التبريد Q بدلالة السطح الداخلي أو السطح الخارجي لانتقال الحرارة على التوالي كما يلي

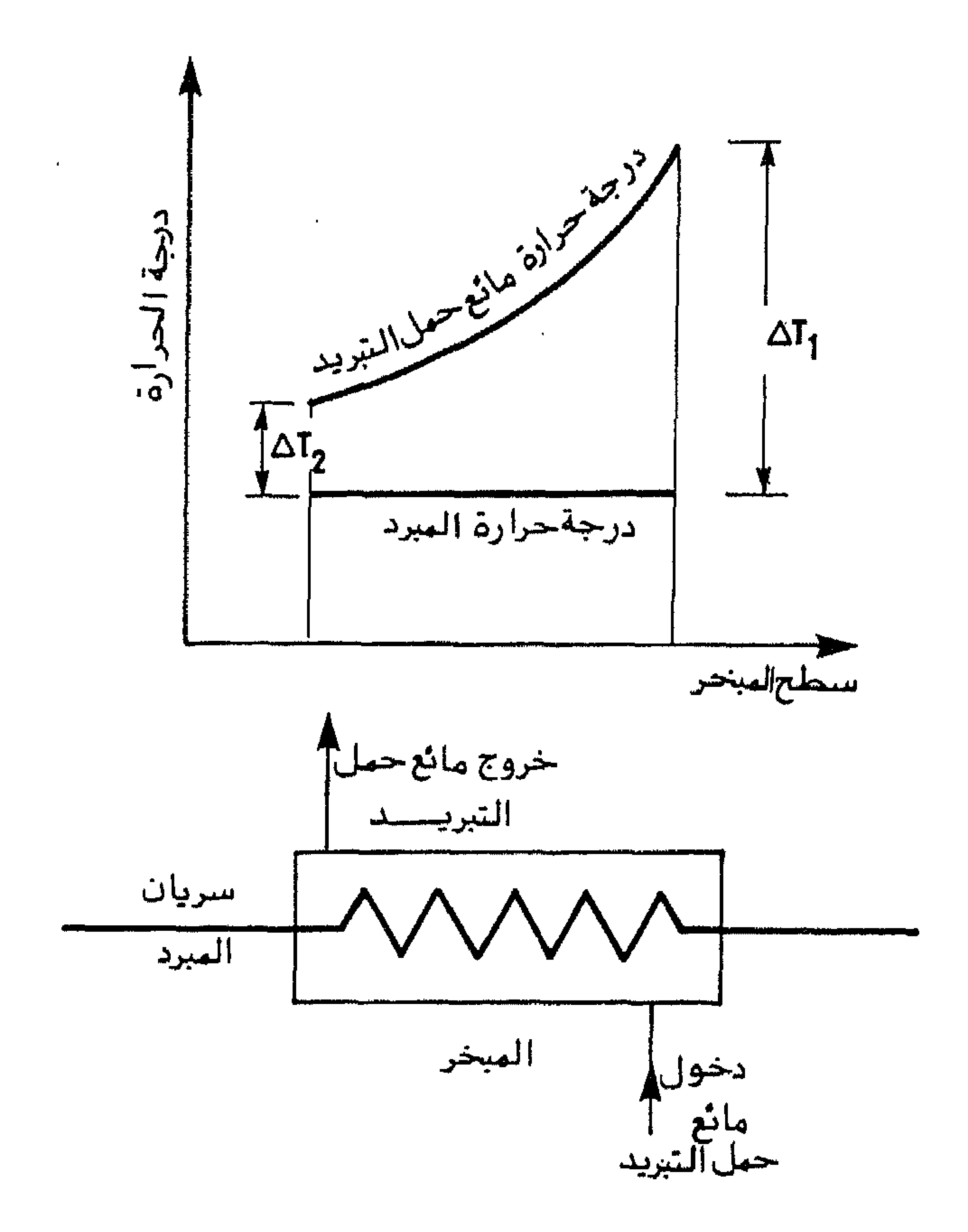
$$Q = U_i A_i \Delta T_m \tag{3.8}$$

$$= U_o A_o \Delta T_m, \tag{3.9}$$

حيث ΔT_m هي متوسط فرق درجات الحرارة بين المبرد والحمل الحراري . وتعطى قيمة ΔT_m بدلالة فرق درجات الحرارة بين المبرد والحمل الحراري عند الدخول إلى المبخر والخروج منه كما هو معرف بشكل ٣ . ١٨ كما يلي

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \dfrac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \tag{3.10}$$

وتعتمد سعة تبريد المبخر كما هو مبين بالمعادلتين ٣ . ٨ و ٣ . ٩ على قيمة UA للمبخر ولخفض التكلفة يجتهد مصممو المبخرات على الحفاظ على قيمة مرتفعة للمعامل الكلي لانتقال الحرارة U مما يساعد على خفض قيمة مساحة سطح انتقال الحرارة بالمبخر اللازمة



شكل ١٨ . ٣ توزيع درجتي حرارة مائع التبريد والمبرد خلال سطح المبخر.

لكل وحدة من سعة التبريد . وهناك عدة وسائل للحصول على قيمة مرتفعة للمعامل U، من أهمها الآتي (أنظرمعادلتي ٦ . ٣ و ٧ . ٣)

أ) تشغيل المبخر عند قيمتين مرتفعتين لمعاملي انتقال الحرارة بالحمل h_i و h_o وذلك بتصميم المبخر بحيث تكون سرعتا المبرد ومائع حمل التبريد كبيرتين نسبياً . كذلك يصمم المبخر بحيث تكون السريانات على سطح انتقال الحرارة مضطربة مما يحسن عملية انتقال الحرارة بالحمل من وإلى سطح المبخر .

ب) تنظيف سطح انتقال الحرارة المعرض لمائع الحمل الحراري واتخاذ اللازم لمنع اتساخ السطح ، أو إبطاء معدل اتساخه .

جـ) تصميم المبخر بحيث تكون سرعة المبرد خلاله كافية لمنع ترسب زيت التزييت المحمول بالمبرد على أسطح انتقال الحرارة .

د) اختيار مادة تصنيع المبخر من أفضل المواد توصيلاً للحرارة (أي مواد ذات قيمة مرتفعة لمعامل التوصيل الحراري) وأن يكون سمك جدار المبخر أقل ما يمكن .

ويتضح مما سبق أنه يلزم عند تشغيل المبخر ، بالإضافةإلى تصميمه ، مراعاة البندين ب و جـ عاليه لضمان الحصول على سعة التبريد الاسمية للمبخر .

ولحساب U_i أو U_o من المعادلتين ٣.٦ و ٣.٧ يجب أولاً حساب قيمتي معاملي انتقال الحرارة h_i و h_o ، ويمكن لهذا الغرض الرجوع إلى مراجع انتقال الحرارة ومنها على سبيل المثال [روزينو وهارتنت ١٩٧٣ ، وكريث وبلاك ١٩٨٠. ، و أوزيسك ١٩٨٥ ، والأشراي ١٩٨٩] .

٣.٩ فرق درجة حرارة المبخر

يعتمد اختيار المبخر لتطبيق ما ، سواء كان لتبريد سوائل أم هواء ، على عدة عوامل أهمها الآتي :

أ) أن تكون سعة تبريد المبخر مساوية لسعة التبريد المطلوبة في التطبيق

ب) أن تصل درجة حرارة الحمل الحراري بالتطبيق إلى درجة حرارة التصميم

جـ) أن يكون أداء المبخر اقتصادياً عند ظروف التشغيل المختلفة

د) أن تكون تكلفته الأولية في الحدود المسموح بها للمشروع

هـ) أن يكون حجمه ومواصفات أبعاده في حدود الحيز المتاح له بالمشروع .

ويضاف إلى هذه العوامل الخمس السابقة عاملاً سادساً في حالة تطبيقات مبردات الهواء التي تتطلب تحكم في الرطوبة النسبية بالإضافة إلى التحكم في درجة الحرارة . ويعرف هذا العامل بفرق درجة حرارة المبخر ويعطى له الرمز TD. وتُعَرف فرق درجة حرارة المبخر بأنها الفرق في درجات الحرارة بين الهواء الداخل إلى المبخر (ويؤخذ عادة مماثلاً لدرجة حرارة المكان المطلوب تبريده) ودرجة حرارة المُبَرِّد (عند درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المبخر) داخل المبخر . ونلفت نظر القارئ هنا إلى اختلاف فرق درجات حرارة المبخر TD عن متوسط فرق درجات الحرارة ΔT_m المعرفة بالمعادلة ١٠ ,٣ .

وتعتمد سعة تبريد المبخر على فرق درجة حرارة المبخر ، فتتغير سعة التبريد خطياً مع TD، عند ثبات ظروف التشغيل الأخرى . فمثلاً بزيادة قيمة درجة حرارة المبخر من ٢°م إلى ٤°م تزيد سعة التبريد إلى الضعف . لذا يجب اختيار أعلى قيمة ممكنة لفرق درجة حرارة المبخر لضمان توصيف مبخر صغير السطح نسبياً وبالتالي مقبول التكلفة الأولية .

ويؤثر فرق درجة حرارة المبخر مباشرة في الرطوبة النسبية للهواء الخارج من المبخر فبارتفاع قيمة TD تقل الرطوبة النسبية للهواء وبانخفاض قيمة TD تزيد قيمة الرطوبة النسبية . ويعزى هذا إلى اعتماد درجة حرارة سطح المبخر على هذا الفرق ، مما يعني انخفاض درجة حرارة سطح المبخر بزيادة TD، وهذا بالضرورة يعني زيادة الفرق بين درجة حرارة سطح المبخر ودرجة حرارة نقطة الندى للهواء الداخل إلى المبخر ، أي زيادة معدل تجفيف الهواء . لذا يلزم توصيف فرق درجة حرارة المبخر لتطبيق ما ، إذا ما طُلِبَ التحكم في الرطوبة النسبية للهواء بهذا التطبيق .

ومن بين التطبيقات العديدة التي تتطلب تحكم في الرطوبة النسبية للهواء ،

تكييف الهواء وحفظ الأغذية المكشوفة كاللحوم والخضروات والفاكهة ومنتجات الألبان في مخازن وثلاجات التبريد . وفي التطبيق الأخير - حفظ الأغذية - يؤثر انخفاض الرطوبة النسبية للهواء على تلف هذه الأغذية نتيجة التجفيف الزائد ، أما ارتفاع الرطوبة النسبية فيؤدي إلي نمو الفطريات والبكتريا والعفن على سطح هذه الأغذية . لذا يصبح من الضروري حفظ الأغذية المكشوفة عند الرطوبة النسبية المثلى المناظرة لدرجة الحرارة المثلى . أيضاً تعتمد الراحة الحرارية للأشخاص الموجودين في مكان مكيف على الرطوبة النسبية بالإضافة إلى درجة حرارة الهواء ، لذا يوصى بتوصيف الرطوبة النسبية ودرجة الحرارة داخل المكان المكيف في معظم تطبيقات تكييف الهواء . أما الأغذية المعلبة فلا يحتاج تخزينها إلى تحكم في الرطوبة النسبية .

ويوصي مصنعو المبخرات بقيم محددة لفرق درجة حرارة المبخر للحصول على الرطوبة النسبية المطلوبة ، وتعتمد هذه القيم على درجة حرارة الهواء وكيفية انتقال الحرارة بين سطح المبخر والهواء ، أي إن كان انتقال الحرارة بالحمل الحراري أم بالحمل الطبيعي . ويبين جدول ٣.٣ القيم الموصى بها لفرق درجة حرارة المبخر عند ظروف تشغيل مختلفة [دوسات ١٩٨١] .

٣.١٠ أداء مبردات السوائل واختيارها

يختلف أداء المبخرات باختلاف ظروف تشغيلها . ويعطي مصنعو وحدات التبريد بيانات أداء وحداتهم عند ظروف التشغيل المختلفة لمساعدة مهندسي التبريد اختيار أفضل الوحدات التي تناسب احتياجهم والتنبؤ بأداء هذه الوحدات عند ظروف التشغيل المختلفة. وتتوفر المبخرات في الأسواق على عدة أشكال أهمها الآتي :

جدول ٣.٣ القيم الموصى بها لفرق درجة حرارة المبخر عند ظروف تشغيل مختلفة [دوسات ١٩٨١].

درجة الحرارة	الرطوبة النسبية	فرق درجة حرارة المبخر TD، °م	
	٪	حمل حر	حمل قسري
	٩٥ -٩١	٧ - ٨	٥ - ٦
أعلى	٩٠ - ٨٦	٨ - ٩	٦ - ٧
من	٨٥ - ٨٠	٩ - ١٠	٧ - ٨
- ١٢°م	٨٠ - ٧٦	١٠ - ١١	٨ - ٩
	٧٥ - ٧٠	١١ - ١٢	٩ - ١٠
أقل من - ١٢°م	أي نسبة	٦	٦

أ) وحدة منفصلة يتم اختيارها تبعاً لنوع التطبيق المستخدم ، ثم توصل بالموقع إلى الوحدات الأخرى لدورة التبريد .

ب) وحدة متكاملة مع دورة التبريد ، كما هو الحال في العديد من التطبيقات ، كالثلاجات المنزلية والمجمدات المنزلية ، ووحدات تكييف هواء الشباك ، وغيرها .

جـ) وحدة متكاملة مع الضاغط وصمام التمدد ، يتم توصيلها بالموقع إلى المكثفات المناسبة مع سعة تبريد هذه الوحدات.

ويبين جدول ٣.٤ بيانات الأداء لبعض الوحدات سابقة التجميع من مبردات السوائل التي يتم تبريد مكثفاتها بالهواء [شركة كارير ١٩٨٢ ، كتالوج ٣١-٥٢٣-٠] وللتعرف على كيفية استخدام هذه الجداول ، نعرف أولاً الأعمدة المختلفة بجدول ٣.٤ (مرتبة من اليسار إلى اليمين)

جدول ٣.٤ بيانات الأداء لوحدات تبريد مجمعة (مبردات) ، تبريد المكثفات بالهواء [شركة كارير ١٩٨٢ ، كتالوج ٣١. - ٥٢٣] .

UNIT 30		CAP. (Tons)	SDT (F)	COMPR KW	COOLER FLOW DATA		CAP. (Tons)	SDT (F)	COMPR KW	COOLER FLOW DATA		CAP. (Tons)	SDT (F)	COMPR KW	COOLER FLOW DATA	
					Gpm	PD				Gpm	PD				Gpm	PD
		85 F Condenser Entering Air Temperature														
		40 F LCWT					42 F LCWT					44 F LCWT				
GA	020	17.9	109.8	18.3	42.7	3.7	18.6	110.9	18.6	44.6	4.0	19.5	111.9	19.0	46.6	4.3
	025	23.0	110.0	23.6	54.9	5.9	24.0	111.0	24.2	57.5	6.4	25.1	112.1	24.7	60.0	7.0
	030	26.2	107.2	25.6	62.6	7.6	27.3	108.1	26.2	65.4	8.2	28.5	109.1	26.7	68.2	8.9
GB	040	35.0	112.9	37.2	83.7	9.8	36.5	114.0	38.0	87.3	10.6	38.0	115.1	38.8	90.9	11.5
	045	43.5	112.5	45.4	104.0	8.6	45.3	113.7	46.4	108.5	9.3	47.2	114.8	47.5	113.1	10.1
	055	50.4	114.0	53.8	120.6	11.4	52.5	115.2	55.1	125.7	12.3	54.7	116.3	56.4	130.9	13.3
	070	66.4	112.5	71.0	158.8	12.8	69.2	113.6	72.7	165.6	13.9	72.1	114.7	74.3	172.6	15.0
GA	085	79.7	114.0	89.1	190.5	11.2	83.0	115.1	91.2	198.5	12.1	86.4	116.3	93.3	206.8	13.1
	105	98.8	114.3	106.5	236.2	9.3	102.5	115.3	108.8	245.3	10.0	106.3	116.4	111.1	254.5	10.7
	110	108.0	117.3	131.4	258.3	11.0	112.0	118.4	134.4	267.9	11.9	116.0	119.5	137.5	277.7	12.7
	120	115.7	120.2	154.8	276.6	12.6	119.8	121.4	158.5	286.6	13.5	123.9	122.6	162.3	296.7	14.4
		45 F LCWT					46 F LCWT					48 F LCWT				
GA	020	19.9	112.5	19.2	47.6	4.5	20.3	113.0	19.4	48.6	4.7	21.2	114.1	19.8	50.7	5.1
	025	25.6	112.6	25.0	61.3	7.3	26.1	113.2	25.3	62.6	7.6	27.2	114.3	25.8	65.2	8.2
	030	29.1	109.6	27.0	69.6	9.2	29.7	110.1	27.3	71.1	9.6	30.9	111.1	27.8	74.0	10.4
GB	040	38.8	115.7	39.2	92.8	11.9	39.5	116.3	39.6	94.7	12.4	41.1	117.5	40.4	98.6	13.4
	045	48.2	115.4	48.0	115.4	10.5	49.2	116.0	48.5	117.8	10.9	51.2	117.2	49.6	122.6	11.8
	055	55.8	116.9	57.0	133.5	13.9	56.9	117.6	57.7	136.2	14.4	59.1	118.8	59.1	141.6	15.5
	070	73.6	115.3	75.2	176.1	15.6	75.0	115.8	76.0	179.7	16.2	78.0	117.0	77.7	187.0	17.5
GA	085	88.1	116.9	94.4	211.0	13.6	89.8	117.5	95.5	215.2	14.2	93.4	118.7	97.6	223.8	15.3
	105	108.2	116.9	112.3	259.2	11.1	110.2	117.4	113.5	263.9	11.5	114.1	118.5	115.9	273.5	12.3
	110	118.0	120.1	139.1	282.6	13.1	120.1	120.7	140.6	287.6	13.6	124.2	121.9	143.8	297.7	14.5
	120	126.0	123.2	164.1	301.8	14.9	128.2	123.8	166.0	307.0	15.4	132.4	125.0	169.9	317.4	16.4

UNIT 30		CAP. (Tons)	SDT (F)	COMPR KW	COOLER FLOW DATA		CAP. (Tons)	SDT (F)	COMPR KW	COOLER FLOW DATA		CAP. (Tons)	SDT (F)	COMPR KW	COOLER FLOW DATA	
					Gpm	PD				Gpm	PD				Gpm	PD
		105 F Condenser Entering Air Temperature														
		40 F LCWT					42 F LCWT					44 F LCWT				
GA	020	15.4	127.4	20.1	36.8	2.8	16.1	128.3	20.5	38.5	3.0	16.9	129.4	21.0	40.4	3.3
	025	19.5	127.1	25.4	46.6	4.3	20.4	128.1	26.2	48.9	4.7	21.4	129.2	26.9	51.3	5.2
	030	22.8	125.2	28.7	54.6	5.8	23.9	126.1	29.4	57.1	6.4	24.9	127.0	30.1	59.7	6.9
GB	040	30.4	130.3	40.7	72.6	7.5	31.7	131.4	41.7	75.9	8.1	33.1	132.4	42.7	79.2	8.8
	045	37.8	130.0	50.0	90.3	6.5	39.4	131.1	51.3	94.4	7.1	41.2	132.1	52.6	93.6	7.7
	055	44.0	131.5	59.5	105.1	8.8	45.9	132.6	61.0	169.8	9.5	47.8	133.7	62.5	114.5	10.3
	070	57.9	130.1	78.4	138.4	9.8	60.5	131.1	80.3	144.6	10.7	63.1	132.1	82.4	151.0	11.6
GA	085	69.8	131.6	98.0	166.7	8.7	72.8	132.7	100.5	174.1	9.4	75.9	133.8	103.0	181.7	10.2
	105	87.5	132.1	118.4	209.1	7.4	90.9	133.1	121.2	217.5	7.9	94.4	134.1	124.0	226.0	8.5
	110	95.8	135.1	145.4	229.1	8.8	99.5	136.2	149.0	238.0	9.4	103.2	137.3	152.6	247.1	10.1
	120	103.0	138.1	170.7	246.1	10.1	106.8	139.2	175.0	255.4	10.8	110.6	140.4	179.3	264.9	11.6
		45 F LCWT					46 F LCWT					48 F LCWT				
GA	020	17.2	129.9	21.3	41.3	3.4	17.6	130.4	21.5	42.2	3.6	18.4	131.4	22.0	44.1	3.9
	025	21.9	129.7	27.3	52.5	5.4	22.4	130.2	27.6	53.8	5.7	23.5	131.3	28.4	56.3	6.2
	030	25.5	127.4	30.4	61.0	7.2	26.0	127.9	30.8	62.3	7.5	27.1	128.8	31.5	65.0	8.1
GB	040	33.8	132.9	43.1	80.9	9.2	34.5	133.5	43.6	82.6	9.6	35.9	134.6	44.6	86.1	10.3
	045	42.0	132.7	53.2	100.7	8.1	42.9	133.2	53.8	102.8	8.4	44.7	134.3	55.1	107.2	9.1
	055	48.8	134.3	63.3	116.9	10.7	49.8	134.8	64.1	119.4	11.2	51.9	136.0	65.7	124.4	12.1
	070	64.4	132.7	83.4	154.3	12.1	65.8	133.2	84.4	157.5	12.6	68.5	134.3	86.4	164.2	13.6
GA	085	77.5	134.4	104.3	185.6	10.7	79.1	134.9	105.6	189.5	11.1	82.3	136.0	108.1	197.3	12.0
	105	96.2	134.7	125.4	230.4	8.9	98.0	135.2	126.9	234.8	9.2	101.7	136.2	129.7	243.7	9.9
	110	105.1	137.9	154.4	251.7	10.5	107.0	138.4	156.2	256.4	10.9	110.9	139.5	159.9	265.8	11.7
	120	112.6	140.9	181.4	269.6	12.0	114.6	141.5	183.6	274.4	12.4	118.6	142.7	188.0	284.2	13.3

العمود الأول : يعطى رقم الموديل للمبرد ، فيكون مثلاً GA025 أو GB045 .

العمود الثاني : يعطي سعة التبريد للمكنة (CAP) بالطن .

العمود الثالث : يعطي درجة حرارة التشبع بخط الطرد (SDT) بالدرجة فهرنهيت .

العمود الرابع : يعطي قدرة موتور الضاغط (COMPR) بالكيلووات .

العمود الخامس : يعطي معدل سريان حمل التبريد خلال المبخر (Gpm)بالجالون لكل دقيقة.

العمود السادس : يعطي فقد الضغط لسريان سائل حمل التبريد خلال المبخر (PD) بالقدم ماء .

وتتكرر الأعمدة من الثاني إلى الخامس ست مرات تبعاً لدرجة حرارة الماء المثلج الخارج من مكنة التبريد (LCWT) بالدرجة فهرنهيت ، فيضم الجدول درجات خروج ماء مثلج قدرها ٤٠ و ٤٢ و ٤٤ و ٤٥ و ٤٦ و ٤٨ درجة فهرنهيت . وتعطى البيانات بكل جدول عند درجة حرارة الجو المحيط المستخدم لتبريد مكثف مكنة التبريد . ويشمل جدول ٣.٤ البيانات لدرجة حرارة جو محيط قدرها ٨٥° ف (٢٩.٥° م) و ١٠٥° ف (٤٠.٥° م) ويمكن الرجوع إلى جداول الشركات المصنعة لوحدات التبريد عند درجات الحرارة الأخرى للجو المحيط .

وللاستفادة من البيانات المعطاة ، نعطي الآن علاقات تحويل الوحدات المعطاة بهذه الجداول إلي نظام الوحدات الدولية المستخدمة بالكتاب

طن تبريد = ٣.٥٢ كيلووات تبريد

درجة فهرنهيت = درجة مئوية x $\frac{٩}{٥}$ + ٣٢

قدم ماء = ٢.٩٩ كيلوباسكال

جالون / دقيقة = ٠.٠٦٣١ لتر/ثانية

ويبين المثال التالي كيفية استخدام هذه الجداول .

مثال ٣.٣

أوجد رقم موديل مكنة التبريد ومواصفاتها التي تعمل في درجة حرارة جو محيط قدرها ٢٩.٥°م بحمل تبريد قدره ١.٥ طن تبريد بحيث تكون درجة حرارة الماء المثلج الخارج من مكنة التبريد يساوي ٥.٦°م .

الحل

درجة حرارة خروج الماء المثلج من المكنة = ٥.٦°م x $\frac{9}{5}$ + ٣٢ = ٤٢ ° ف

درجة حرارة الجو المحيط = ٢٩.٥°م x $\frac{9}{5}$ + ٣٢ = ٨٥ ° ف

من جدول ٣.٤ نجد أن أقرب مكنة تعطي حمل التبريد المطلوب هي موديل *UNIT30-GA110* ومواصفاتها كما يلي :

سعة التبريد = ١١٢ طن = ١١٢ x ٣.٥٢ = ٣٩٤.٢٤ كيلووات تبريد

درجة حرارة التشبع بخط الطرد = ١١٨.٤ ° ف = ٤٨ ° م

قدرة موتور الضاغط = ١٣٤.٤ كيلووات

معدل سريان سائل حمل التبريد إلى المكنة = ٢٦٧.٩ جالون / دقيقة = ١٦.٩ لتر/ثانية

فقد الضغط في سريان سائل حمل التبريد خلال المكنة =١١.٩قدم ماء = ٣٥.٥٨ كيلوبسكال

مثال ٣.٤

في المثال السابق أوجد بيانات أداء نفس مكنة التبريد المختارة إذا أصبحت درجة حرارة الجو المحيط ٤٠.٥ ° م (١٠٥ ° ف) مع تغيير معدل سريان سائل حمل التبريد خلال المكنة لتثبيت درجة حرارة خروج السائل من المكنة .

الحل

الموديل المستخدم لمكنة التبريد هو *UNIT30-GA110*. من جدول ٣.٤ بتثبيت الموديل للمكنة وقيمة *LCWT* عند ٤٢ ° ف تصبح المواصفات كما يلي

سعة التبريد = ٩٩.٥ طن تبريد = ٣٥٠.٢٤ كيلووات

درجة حرارة التشبع بخط الطرد = ١٣٦.٢ ° ف = ٥٧.٩ ° م

قدرة موتور الضاغط = ١٤٩.٠ كيلووات

معدل سريان سائل حمل التبريد إلى المكنة =٢٣٨.٠ جالون/دقيقة = ١٥.٠٢ لتر/ثانية

نقد الضغط في سريان سائل حمل التبريد خلال المكنة = ٩.٤قدم ماء = ٢٨.١ كيلوبسكال .

٣.١١ أداء مبردات الهواء واختيارها

يعتمد أداء مبردات الهواء على الظروف الخارجية الآتية

أ) معدل سريان الهواء على المبخر

ب) درجة حرارة دخول الهواء إلى المبخر (درجة حرارة البصيلة الجافة)

جـ) درجة حرارة البصيلة المبتلة عند الدخول إلى المبخر .

وعليه يكون سطح المبخر مبتلاً ، أي يحدث تكثيف لبخار الماء بالجو ، إذا قلت درجة حرارة نقطة الندى للجهاز عن درجة حرارة نقطة الندى للهواء الداخل للمبخر ، فإذا لم يتحقق هذا الشرط كان سطح المبخر جافاً أثناء التشغيل .

ويبين جدول ٣.٥ أداء بعض موديلات مكنات التبريد سابقة التجميع عند ظروف تشغيل مختلفة (شركة كارير ١٩٨٢ ، كتالوج ٢٣.-٥٢٥) . وتمثل الأعمدة من اليسار إلى اليمين الآتي

العمـــود الأول : رقم الموديل

العمـــود الثاني : معدل سريان الهواء الداخل إلى المبخر (Cfm) بالقدم المكعب/دقيقة ، ومعامل التجنيب BF لسريان الهواء خلال المبخر

جدول ٣.٥ أداء بعض موديلات مبردات هواء عند ظروف تشغيل مختلفة (شركة كارير ١٩٨٢، كتالوج ٥٢٥-٠.٢٣)

UNIT 50YH	INDOOR AIR		TEMPERATURE AIR ENTERING OUTDOOR COIL (F)											
			75			95			105			115		
	Cfm BF	Ewb (F)	TC	SHC	Kw	TC	SHC	Kw	TC	SHC	Kw	TC	SHC	Kw
024	800 .15	72	32	14	3.0	28	13	3.3	26	13	3.5	24	11	3.6
		67	29	18	2.9	26	18	3.2	23	17	3.4	19	13	3.5
		62	27	24	2.8	21	19	3.1	18	17	3.3	15	14	3.3
	900 .17	72	32	15	3.0	28	13	3.4	26	13	3.6	24	11	3.7
		67	29	19	3.0	26	19	3.2	23	18	3.5	19	14	3.6
		62	27	25	2.9	22	21	3.1	19	18	3.4	16	15	3.4
	1000 .18	72	32	15	3.0	28	14	3.4	26	13	3.6	24	12	3.8
		67	29	20	3.0	26	20	3.3	23	19	3.5	19	15	3.6
		62	28	26	2.9	22	22	3.2	20	19	3.5	17	16	3.4
030	1000 .11	72	34	16	3.1	32	15	3.7	30	15	3.8	28	13	4.0
		67	33	23	3.1	29	21	3.5	26	20	3.7	23	17	3.9
		62	31	27	3.1	24	22	3.4	22	21	3.7	19	18	3.9
	1125 .12	72	34	16	3.2	32	16	3.7	31	15	3.9	29	14	4.1
		67	33	24	3.2	30	22	3.6	27	20	3.8	23	18	4.0
		62	31	28	3.2	25	23	3.5	23	22	3.8	20	19	4.0
	1250 .13	72	34	16	3.3	32	16	3.8	31	16	4.0	29	14	4.2
		67	33	25	3.3	30	23	3.6	27	22	3.8	23	19	4.1
		62	31	28	3.3	26	24	3.6	24	23	3.8	21	20	4.1
036	1200 .11	72	46	23	4.1	43	18	4.7	39	16	4.9	34	15	5.2
		67	44	29	4.1	36	26	4.4	34	24	4.8	30	20	5.0
		62	39	33	4.0	32	29	4.3	29	28	4.7	25	24	4.9
	1350 .12	72	46	23	4.2	43	19	4.8	39	17	5.0	35	16	5.3
		67	44	30	4.2	37	28	4.6	34	25	4.9	30	22	5.1
		62	40	34	4.1	33	30	4.5	30	29	4.8	26	25	5.0
	1500 13	72	46	24	4.3	43	20	4.9	39	17	5.0	35	17	5.4
		67	45	31	4.3	37	29	4.6	35	26	5.0	31	23	5.1
		62	40	35	4.2	34	31	4.6	30	29	4.9	27	26	5.1
042	1400 09	72	50	23	5.2	46	21	5.5	44	20	5.9	39	19	6.2
		67	47	28	5.0	42	29	5.2	38	28	5.7	34	28	6.0
		62	43	39	4.9	37	33	5.2	34	32	5.6	31	30	5.9
	1575 10	72	50	23	5.2	46	22	5.6	44	21	6.0	40	20	6.3
		67	47	29	5.1	43	30	5.4	38	30	5.8	35	29	6.1
		62	43	40	5.0	38	34	5.3	35	33	5.7	32	31	6.0
	1750 11	72	50	24	5.2	46	23	5.7	44	21	6.1	40	21	6.4
		67	47	30	5.2	43	32	5.5	39	31	6.0	35	30	6.2
		62	44	42	5.2	39	36	5.4	36	34	5.9	33	32	6.1
048	1600 10	72	53	25	5.0	52	23	5.8	50	22	6.3	43	20	6.7
		67	51	38	5.0	48	38	5.8	45	33	6.1	40	30	6.4
		62	50	44	5.0	44	41	5.7	40	38	6.0	36	34	6.3
	1800 11	72	53	25	5.1	52	24	5.9	50	23	6.4	43	20	6.8
		67	52	40	5.1	49	39	5.9	46	35	6.3	41	32	6.5
		62	50	46	5.1	45	43	5.8	41	39	6.1	37	35	6.4
	1925 12	72	53	26	5.2	52	24	6.1	50	24	6.5	43	21	6.9
		67	52	41	5.2	49	40	6.0	46	36	6.4	41	34	6.6
		62	51	48	5.2	47	44	6.0	42	41	6.3	38	36	6.6
054	1575 10	72	63	31	6.1	60	29	6.8	54	26	7.2	47	25	7.5
		67	59	46	6.1	53	40	6.4	45	36	7.0	38	29	7.2
		62	55	50	5.9	46	46	6.3	41	39	6.8	36	29	7.1
	1800 11	72	64	32	6.2	61	30	6.9	55	27	7.3	48	29	7.6
		67	60	47	6.2	54	41	6.5	46	37	7.1	39	30	7.3
		62	56	51	6.0	47	47	6.4	42	40	6.9	37	30	7.2
	1925 12	72	64	32	6.4	61	31	7.0	56	28	7.5	48	29	7.8
		67	60	48	6.3	54	42	6.7	47	38	7.3	40	32	7.5
		62	57	53	6.2	48	48	6.6	43	41	7.1	38	31	7.4
060	1800 10	72	67	33	6.2	63	32	6.8	57	29	7.1	51	26	7.4
		67	63	44	6.1	57	41	6.5	51	37	6.8	44	34	7.1
		62	57	51	6.0	50	46	6.4	45	42	6.8	39	36	7.1
	2150 11	72	69	35	6.4	64	33	7.0	58	31	7.3	52	28	7.6
		67	64	46	6.3	58	43	6.7	52	39	7.0	45	35	7.3
		62	57	53	6.2	51	48	6.6	46	44	6.9	40	38	7.2
	2250 .11	72	69	35	6.5	64	34	7.1	58	32	7.4	52	29	7.7
		67	65	47	6.3	58	43	6.8	52	40	7.1	46	36	7.4
		62	58	54	6.2	51	48	6.7	46	44	7.0	41	39	7.4

العمـود الثالث : درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء الداخل إلى المبخر (Ewb) بالدرجة الفهرنهيت

العمـود الرابع : سعة التبريد الكلية للمكنة (TC) ، ١٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية/ساعة

العمود الخامس : سعة التبريد للحرارة النوعية (SHC) ، ١٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية/ساعة

العمود السادس : قدرة تشغيل موتور المكنة (Kw) بالكليلووات .

وتُعْطَي القيم بالعمود الرابع إلى السادس لدرجة حرارة بصيلة جافة قدرها ٧٥° ف للهواء الداخل إلى المكثف ، ثم تكرر هذه الأعمدة لدرجات حرارة قدرها ٩٥ و ١٠٥ و ١١٥ ° ف . ولتحويل الوحدات المعطاة بجدول ٣.٥ إلى وحدات النظام الدولي المستخدمة في الكتاب الحالي تستخدم العلاقات الآتية :

قدم[٣] / دقيقة = ٠.٤٧٢ لتر/ث

١ طن تبريد = ١٢٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية/ساعة = ٣.٥٢ كيلووات تبريد

١ درجة فهرنهيت = ١ درجة مئوية x $\frac{9}{5}$ + ٣٢

ويجب عند استخدام جدول ٣.٥ مراعاة الآتي

أ) يمكن استخدام استكمال خطي داخلي للقيم المعطاة بالجدول ، وغير مسموح بالاستكمال الخطي الخارجي .

ب) القيم المعطاة لسعة التبريد للحرارة النوعية (SHC) محسوبة عند ٨٠ ° ف درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء الداخل للمبخر ، لذلك يجب أن تصحح كما يلي

$$(SHC)_c = (SHC) + CF \times Cfm \qquad (3.11)$$

حيث CF هي معامل تصحيح يعطى كما يلي

$$CF = 1.09 \times (1 - BF) \times (T'_{dbi} - 80) \qquad (3.12)$$

وتكون T'_{dbi} هي درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء الداخل إلى المبخر ، بالدرجة فهرنهيت .

جـ) تحسب درجة حرارة البصيلة الجافة (بالدرجة فهرنهيت) للهواء الخارج من المبخر كما يلي

$$T'_{dbo} = T'_{dbi} - \frac{(SHC)_c}{1.09 \times Cfm} \qquad (3.13)$$

حيث $(SHC)_c$ هي القيمة المصححة لسعة التبريد للحرارة النوعية ، كما تم حسابها من المعادلة ٣.١١ .

ويلزم التنويه هنا إلى ضرورة استخدام خريطة السيكرومتري للهواء الرطب مع البيانات المعطاه بالجدول للتنبأ بحالة الهواء عند الخروج من المبخر الذي يتم اختياره من الجدول . ويوضح المثال التالي كيفية استخدام جدول ٣.٥ لاختيار مبخر لتبريد هواء عند ظروف تشغيل معينة .

مثال ٣.٥

اختر مبرد هواء لتبريد ٦٠٠ لتر/ث من الهواء عند ٣٥ °م درجة حرارة بصيلة جافة ، و ٢٢°م درجة حرارة بصيلة مبتلة ، افرض أن درجة حرارة الهواء الخارجي تساوي ٣٥°م (أي ٩٥° ف) . تنبأ بأداء المبخر الذي يتم اختياره عند ظروف التشغيل المعطاه .

الحل

معدل سريان الهواء المطلوب تبريده = ٦٠٠لتر/ث ÷ ٠,٤٧٢ = ١٢٧١ قدم^3 / دقيقة

درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء عند الدخول = ٣٥ x $\frac{٩}{٥}$ + ٣٢ = ٩٥ ° ف

درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء عند الدخول = ٢٢ x $\frac{٩}{٥}$ + ٣٢ = ٧١.٦ ° ف

من جدول ٥.٣ نجد أن مكنة موديل 50YH - 036 تعطي معدل سريان الهواء المطلوب ، وبياناتها بالجدول عند درجة حرارة بصيلة جافة ٩٥ ° ف كما يلي

Cfm	*BF*	*Ewb*	*TC*	*SHC*	*Kw*
1200	0.11	72	43	18	4.7
		67	36	26	4.4
1350	0.12	72	43	19	4.8
		67	37	28	4.6

وبإجراء استكمال خطي بين السطرين الأول والثاني ، ثم بين الثالث والرابع للحصول على درجة حرارة بصيلة مبتلة عند الدخول قدرها ٧١.٦ ° ف نحصل على الآتي

Cfm	*BF*	*Ewb*	*TC*	*SHC*	*Kw*
1200	0.11	71.6	42.44	18.64	4.68
1350	0.12	71.6	42.52	19.72	4.79

وبإجراء استكمال خطي بين السطرين السابقين للحصول على معدل سريان هواءقدره ١٢٧١قدم^{٣} / دقيقة نحصل على الآتي

Cfm	*BF*	*Ewb*	*TC*	*SHC*	*Kw*
1271	0.115	71.6	42.48	18.68	4.73

ويحسب معامل تصحيح سعة التبريد للحرارة النوعية من معادلة (٣.١٢) كما يلي

$$CF = 1.09 \times (1 - 0.115)\ (95 - 80) = 14.47$$

وتصحح قيمة سعة تبريد الحرارة النوعية كما يلي

$$(SHC)_c = (18.68 \times 10^3 + 14.47 \times 1271\ ) = 37.07 \times 10^3 \quad \text{Btu/hr}$$

وتحسب درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء الخارج من المبخر من معادلة (٣.١٣) كما يلي

$$T'_{dbo} = 95 - \frac{37.07 \times 10^3}{1.09 \times 1271} = 68.24\ {}^oF$$

وبالتحويل إلى النظام الدولي للوحدات يكون أداء المكنة موديل 50YH-036 كما يلي

معدل سريان الهواء = ٦٠٠ لتر/ث

درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء عند دخول المبرد = ٣٥ °م

درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء عند الدخول للمبخر = ٢٢ °م

درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء عند الخروج من المبخر = (٦٨.٢٤-٣٢) x $\frac{٥}{٩}$ = ٢٠.١ °م

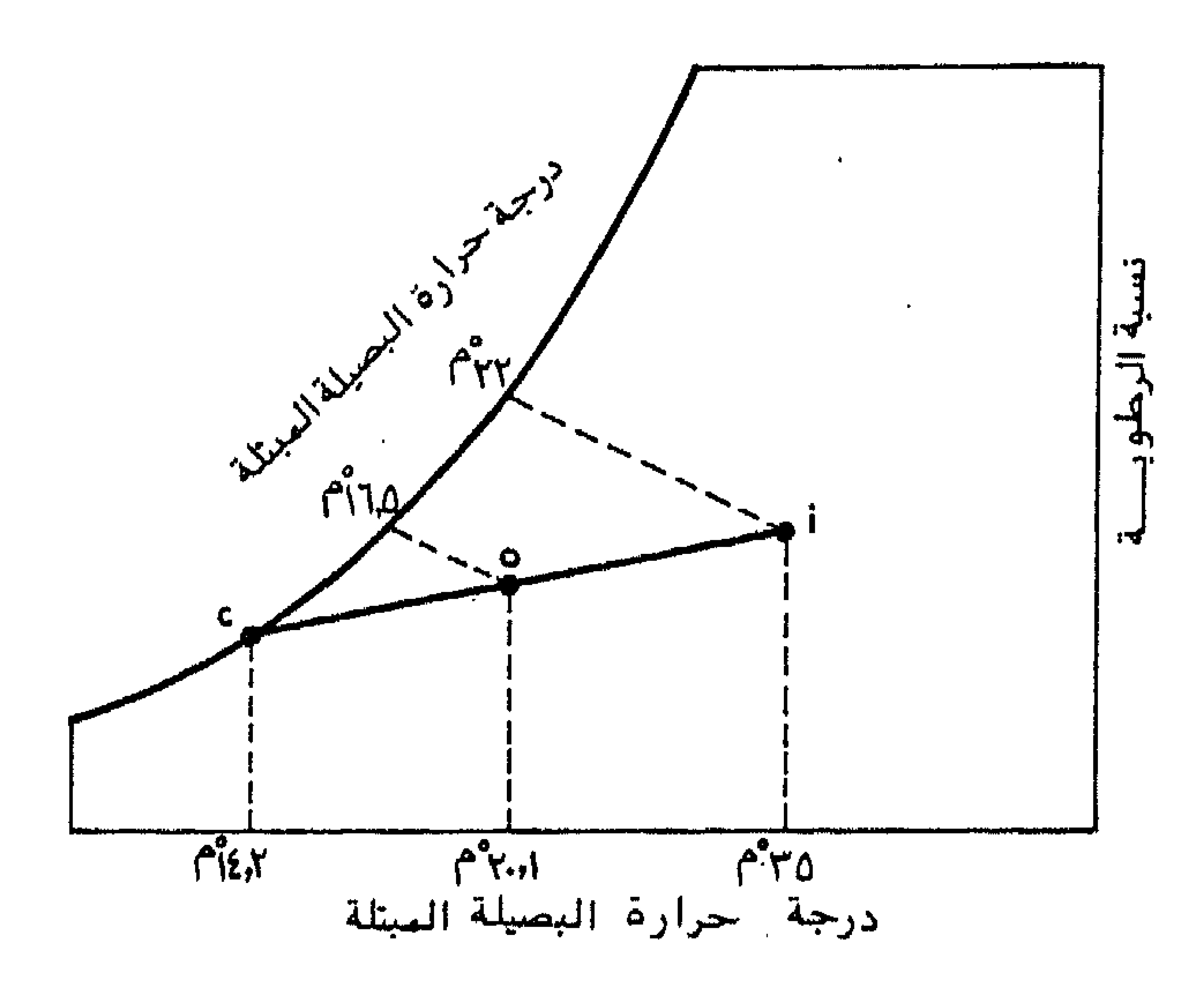
وباستخدام خريطة السيكرومتري بملحق أ واستخدام البيانات السابقة ، وحيث أن نسبة سعة التبريد النوعية إلى سعة التبريد الكلية = ٣٧,٧ ÷ ٤٢.٤٨ = ٠.٨٧ . فإنه يمكن رسم عملية التبريد على الخريطة كما هو موضح بشكل ٣.١٩ . ومن الخريطة ينتج الآتي :

درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء الخارج من المبخر = ١٦.٥ °م

درجة حرارة نقطة الندى للجهاز = ١٤.٢ °م .

٣.١٢ دورة إذابة الصقيع

عند مرور الهواء على سطح المبخر البارد نسبياً يتكثف بخار الماء الموجود بالهواء على سطح المبخر ، فإذا قلت درجة حرارة سطح المبخر عن الصفر المئوي تجمد الماء



شكل ٣,١٩ رسم أداء مكنة التبريد بمثال ٣,٥ .

الناتج عن التكثيف مكوناً جليداً أو ما يعرف بالصقيع . وبمرور الوقت يزداد سمك طبقة الصقيع المتكونة على سطح المبخر مما يؤدي إلى المشكلتين الآتيتين :

١ – عزل سطح المبخر حرارياً عن سريان الهواء المطلوب تبريده مما يقلل من كفاءة عملية التبريد .

٢– سد جزء من الفراغ المخصص لسريان الهواء مما يقلل من معدل سريان الهواء خلال المبخر وبالتالي تقل سعة تبريد المبخر .

في هذه الحالة يلزم إذابة الجليد للعودة إلى سعة التبريد الاسمية لمكنة التبريد وتوفير الطاقة . وتظهر مشكلة تكون الصقيع جلية في التطبيقات التي تقل فيها درجة حرارة المبخر عن صفر ° م ويكون الهواء هو وسيط حمل التبريد . وتزداد المشكلة تفاقماً كلما ارتفعت رطوبة الهواء المار على سطح المبخر . ومن الأمثلة التي يتكون فيها الصقيع على سطح المبخر : الثلاجات والمجمدات المنزلية ، ومخازن التبريد ومجمدات وثلاجات حفظ

الأطعمة ، وعمليات التبريد والتجميد في الصناعات الغذائية .

ولإذابة الصقيع ، تصمم مكنات التبريد للعمل بدورة لإذابة الصقيع . وتعمل هذه الدورة أوتوماتياً . وفي حالة التشغيل الأوتوماتي يبدأ تشغيل الدورة بأي من الوسائل الآتية :

أ) ساعة توقيت تعمل على تشغيل دورة إذابة الصقيع على فترات زمنية محددة ولمدة معينة .

ب) ثرموستات لقياس درجة حرارة الهواء الخارج من ملف التبريد (المبخر) . فإن قلت درجة الحرارة في هذا الموقع عن حد السماح – مما يعني انخفاض معدل سريان الهواء خلال ملف التبريد نتيجة انسداده بتراكم الصقيع – عمل الثرموستات على تشغيل دورة إذابة الصقيع .

جـ) حاس لمعدل سريان الهواء خلال ملف التبريد ، وتشغيل دورة إذابة الصقيع إذا قل هذا المعدل عن حد السماح ، مما يعني انسداد ملف التبريد جزئياً بالصقيع .

وفي أي من الطرق السابقة لا تعمل مروحة سريان الهواء على ملف التبريد فور إيقاف دورة إذابة الصقيع ، وإنما يبدأ عملها بعد فترة زمنية قصيرة ، وذلك حتى تنتهي عملية تساقط قطرات الصقيع المذاب إلى قناة التصريف ، ثم يبدأ الجزء القليل المتبقي من الصقيع المذاب في التجمد مرة أخرى مما يحمي سريان الهواء خلال ملف التبريد من حمل أي قطرات ماء إلى الحمل الحراري . كما يساعد هذا التخلف الزمني أيضاً على عدم تدفئة حمل التبريد فجأة عقب انتهاء دورة إذابة الصقيع ، وإنما الانتظار لفترة زمنية حتى تنخفض درجة حرارة الهواء الملامس للمبخر إلى الحد المناسب لحمل التبريد .

ويلزم أن يصاحب المبخرات التي تعمل بدورة لإذابة الصقيع وجود نظام لتصريف الماء الناتج عن إذابة الصقيع ، وأن يراعى في تصميم هذه النظم عدم تجمد الماء في أنابيب

الصرف مما قد يعوق عملية التصريف .

ويلاحظ أن أداء نظام التبريد المصاحب لتكون صقيع يعتمد إلى حد كبير على طول فترة دورة إذابة الصقيع . وهناك طول أمثل لهذه الفترة . فإذا قل طول فترة دورة الصقيع عن هذا الطول الأمثل ، لم يذب الصقيع كلية مسبباً المشاكل التي وضحناها سابقاً. أما إذا طالت فترة دورة إذابة الصقيع نسبياً فإن هذا يسبب إضافة حمل حراري إضافي يقلل من سعة التبريد المؤثرة لنظام التبريد . وعموماً يفضل أن يكون الطول الأمثل لهذه الفترة أقل ما يمكن لتحسين أداء نظام التبريد . ويُفَضّل عادة بين طرق إذابة الصقيع المختلفة تبعاً لطول فترة دورة إذابة الصقيع لكل طريقة . وتضم بعض النظم طريقتين تعملان معاً في نفس الوقت عند بدء دورة إذابة الصقيع وذلك بغرض تقليل الفترة الزمنية اللازمة لهذه الدورة . وفي الجزء التالي نقدم عرضاً موجزاً لأهم طرق إذابة الصقيع .

٣.١٣ طرق إذابة الصقيع

هناك عدة طرق لإذابة الصقيع أهمها الطرق الآتية :

أ) استخدام هواء الحمل الحراري أو هواء من مصدر خارجي

ب) استخدام ماء دافئ أو محلول ملحي دافئ

جـ) استخدام سخان كهربائي

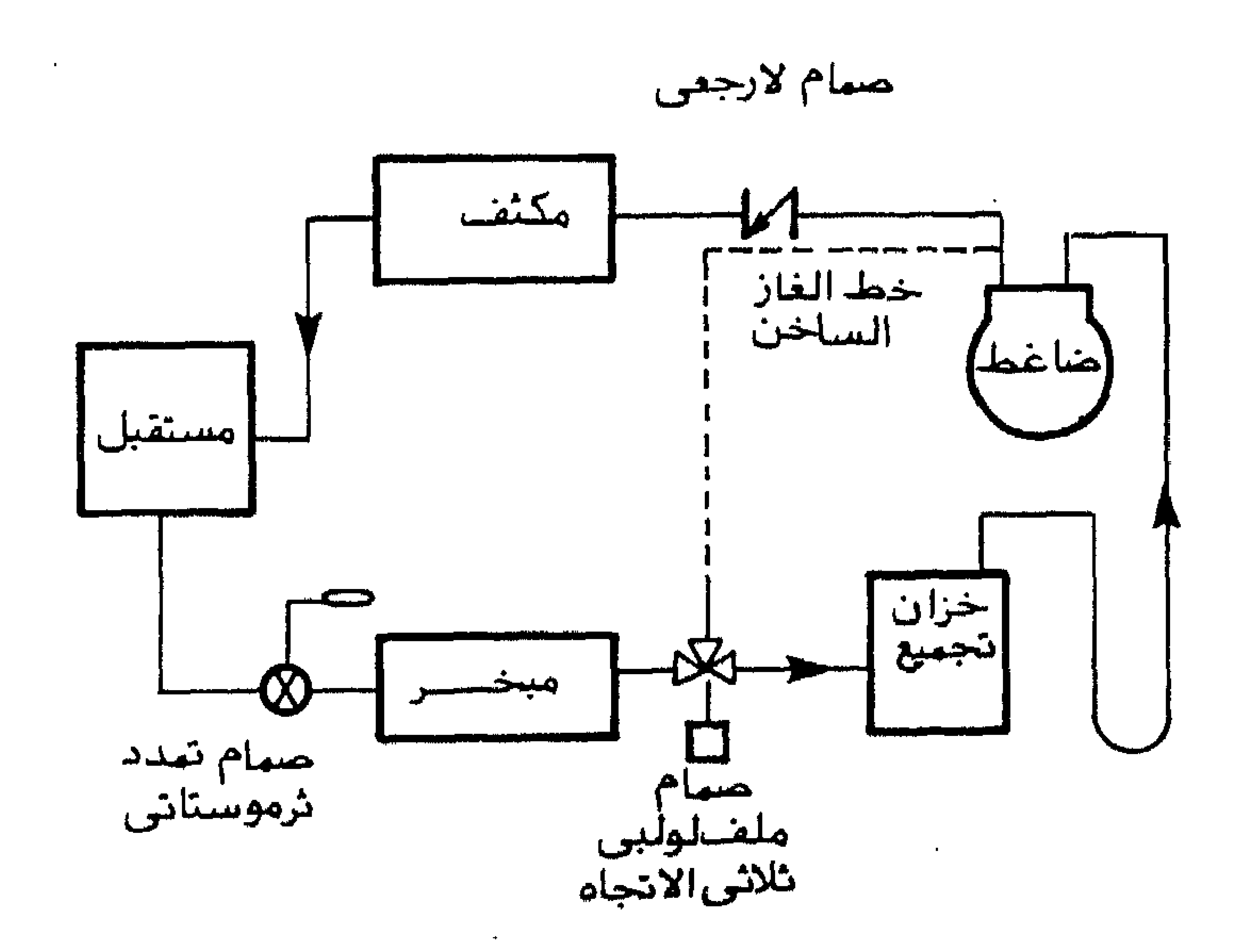
د) استخدام غاز ساخن من الضاغط مباشرة إلى المبخر .

تعتبر الطريقة الأولى هي أقل الطرق شيوعاً لإذابة الصقيع . ففي هذه الطريقة تُوقَفُ دورة التبريد (بإيقاف الضاغط) يدوياً أو أوتوماتياً ثم يسمح بتمرير هواء الحمل

الحراري أو هواء خارجي على ملف التبريد لفترة زمنية مما يساعد على إذابة الصقيع . ويمرر هذا الهواء قسرياً باستخدام مروحة أو بالحَمْل الطبيعي . ولقد استخدمت هذه الطريقة في النظم القديمة لمخازن حفظ الأغذية . وتحتاج هذه الطريقة لوقت طويل نسبياً ، بالمقارنة بالطرق الأخرى ، لإذابة الصقيع مما حد من استخدامها حالياً .

يستخدم الماء الدافئ أو محلول الماء الملحي الدافئ في بعض التطبيقات لإذابة الصقيع . ولقد استخدمت هذه الطريقة بكثرة في الماضي ، إلا إن الصناعات الحديثة لم تعد تفضلها كطريقة جيدة لإذابة الصقيع ، وتعتبر الطريقتان الثالثة والرابعة هما أكثر الطرق شيوعاً حالياً نظراً لقصر الفترة الزمنية لإذابة الصقيع بهاتين الطريقتين .

في طريقة التسخين الكهربائي ، يوضع عنصر تسخين كهربائي ملامس مباشرة لسطح ملف التبريد أو لسطح زعانف ملف التبريد . وعند بدء دورة إذابة الصقيع سواء يدوياً أو أوتوماتياً ، تُوقَفُ دورة التبريد ويبدأ العنصر الكهربائي في التسخين مما يذيب

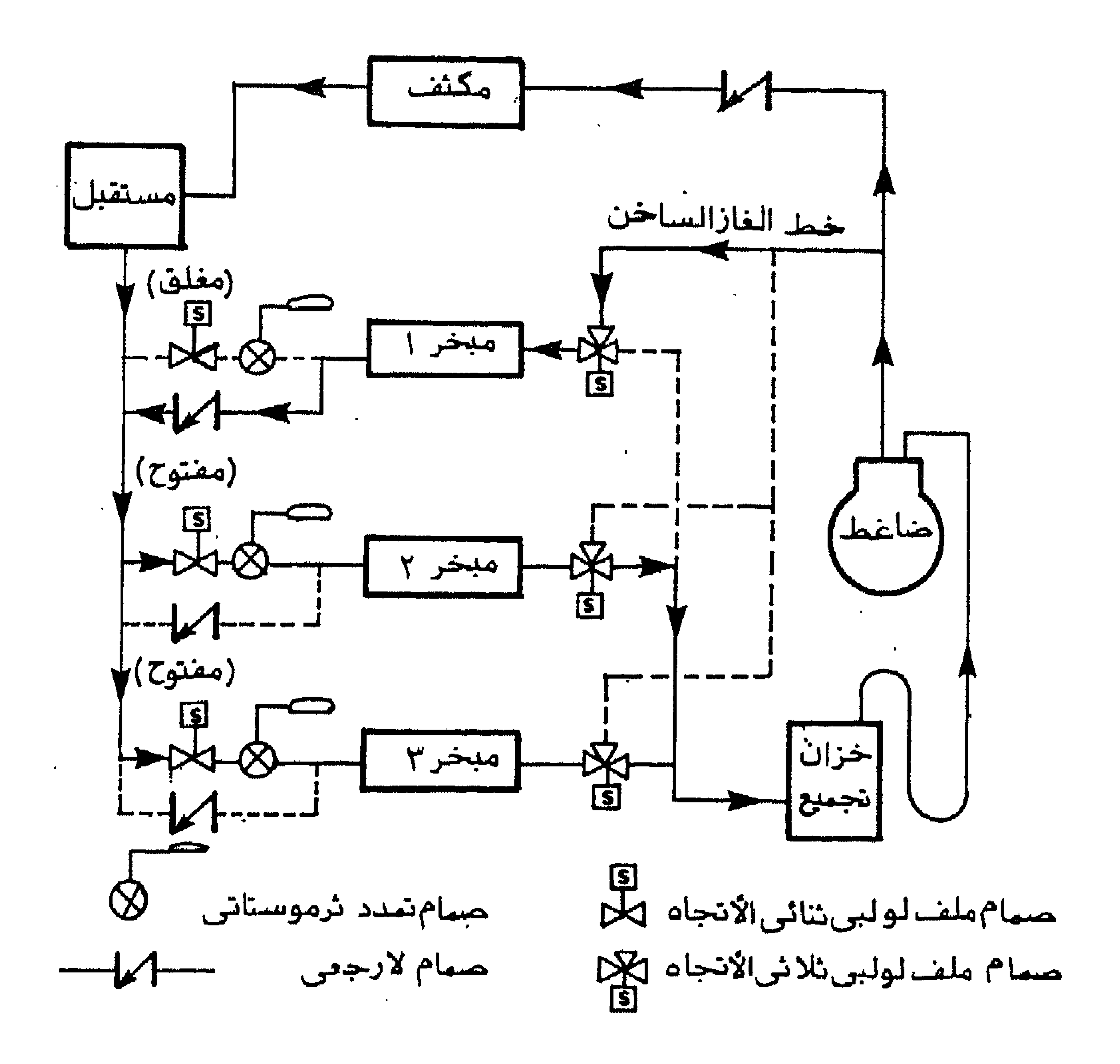


شكل ٢٠ . ٣ الفكرة الأساسيّة لدورة إذابة الصقيع باستخدام غاز ساخن من الضاغط .

الصقيع . وتمتاز هذه الطريقة بالإضافة إلى سرعتها وكفاءتها ، بسهولة تشغيلها وصيانتها وانخفاض تكلفتها الأولية ، إلا أن أهم عيوبها استخدام طاقة كهربائية لإذابة الصقيع مما يعتبر غير اقتصادي من وجهة نظر استهلاك الطاقة . ويستخدم التسخين الكهربائي بكثرة في العديد من الثلاجات والمجمدات المنزلية ووحدات التبريد الصغير نسبياً .

وتعتبر طريقة استخدام الغاز الساخن هي أكثر الطرق شيوعاً على الإطلاق خاصة في وحدات التبريد الكبيرة نسبياً . ففي هذه الطريقة ، يستمر الضاغط في العمل أثناء دورة إذابة الصقيع دون توقف حيث يمد ملف التبريد (المبخر) بالغاز الساخن الذي يعمل على إذابة الصقيع . ويبين شكل ٣.٢٠ رسماً تخطيطياً للفكرة الأساسية لهذه الطريقة . فكما هو مبين بالشكل ، يفتح صمام الملف اللولبي لتوصيل خط الغاز الساخن بالمبخر فيعمل هذا الغاز على إذابة الصقيع المتكون على سطح المبخر .

بيّنّا في الجزء السابق الفكرة الأساسية لاستخدام الغاز الساخن لإذابة الصقيع المتراكم على المبخر . والدورة المبينة لهذا الغرض بشكل ٣.٢٠ لا يمكنها العمل عملياً لعدم وجود حمل حراري يمد الضاغط ببخار المبرد ، مما يعني توقف الضاغط بعد فترة زمنية قصيرة فور ضخ بخار المبرد المتجمع في خزان التجميع . لذا تُستَخدم هذه الدورة فقط عندما يضم نظام التبريد مبخرين أو أكثر ، وضاغط واحد ، حيث يتم إزالة الصقيع بواحد فقط من هذه المبخرات ، على التوالي ، بينما تمد باقي المبخرات النظام بالحمل الحراري اللازم لاستمرار عمل الضاغط . ويبين شكل ٣.٢١ دورة غاز ساخن لنظام تبريد يحوي ثلاث مبخرات . ويبين الشكل حالة تشغيل النظام لإذابة صقيع المبخر ١ ، بينما يعمل المبخران ٢ و ٣ في دورة التبريد المعتادة لإمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لعمله . في هذه الحالة يسري الغاز الساخن خلال صمام الملف اللولبي إلى المبخر لإذابة الصقيع ثم يخرج سائل المبرد إلى خط السائل خلال خط تجنيبي يحوي صمام لارجعي (انظر الشكل) .



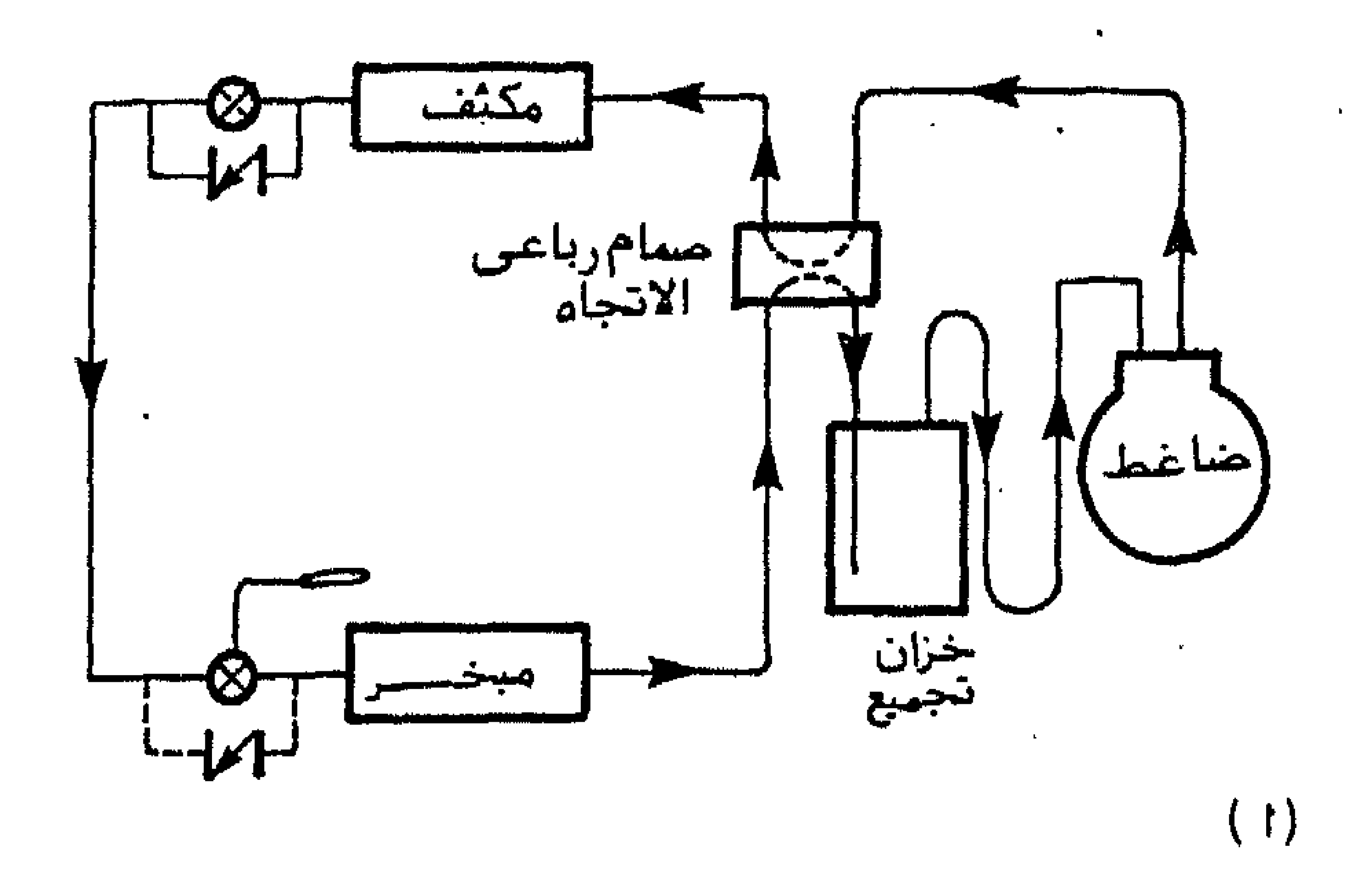
شكل ٣.٢١ دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع بنظام تبريد ذي ثلاث مبخرات (تشغيل دورة التبريد المعتادة بجميع المبخرات ماعدا مبخر ١ حيث تعمل دورة إذابة الصقيع) .

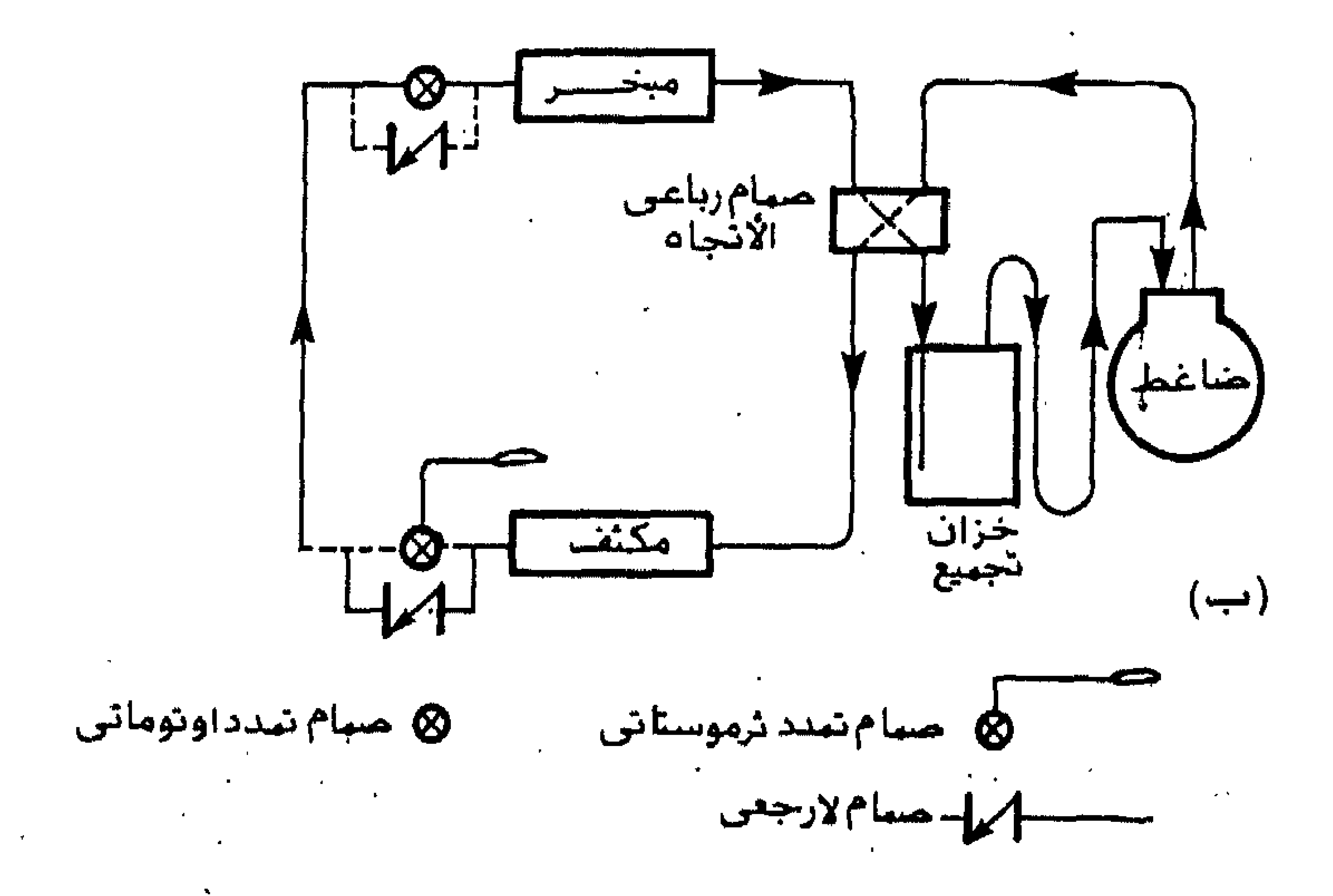
وهناك بعض الحلول الهندسية التي تتبع عادة لاستخدام دورة الغاز الساخن لإذابة الصقيع بنظم المبخر الواحد . وتعمل كل هذه الحلول على توفير حمل حراري لنظام التبريد - أثناء دورة إذابة الصقيع - لإمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لتشغيله . ومن أهم الطرق المتبعة لهذا ، الآتي :

أ) استخدام دورة مضخة حرارية (دورة تبريد معكوسة)

ب) استخدام تخزين حراري (بنك حراري)

جـ) استخدام مصدر حراري مساعد .



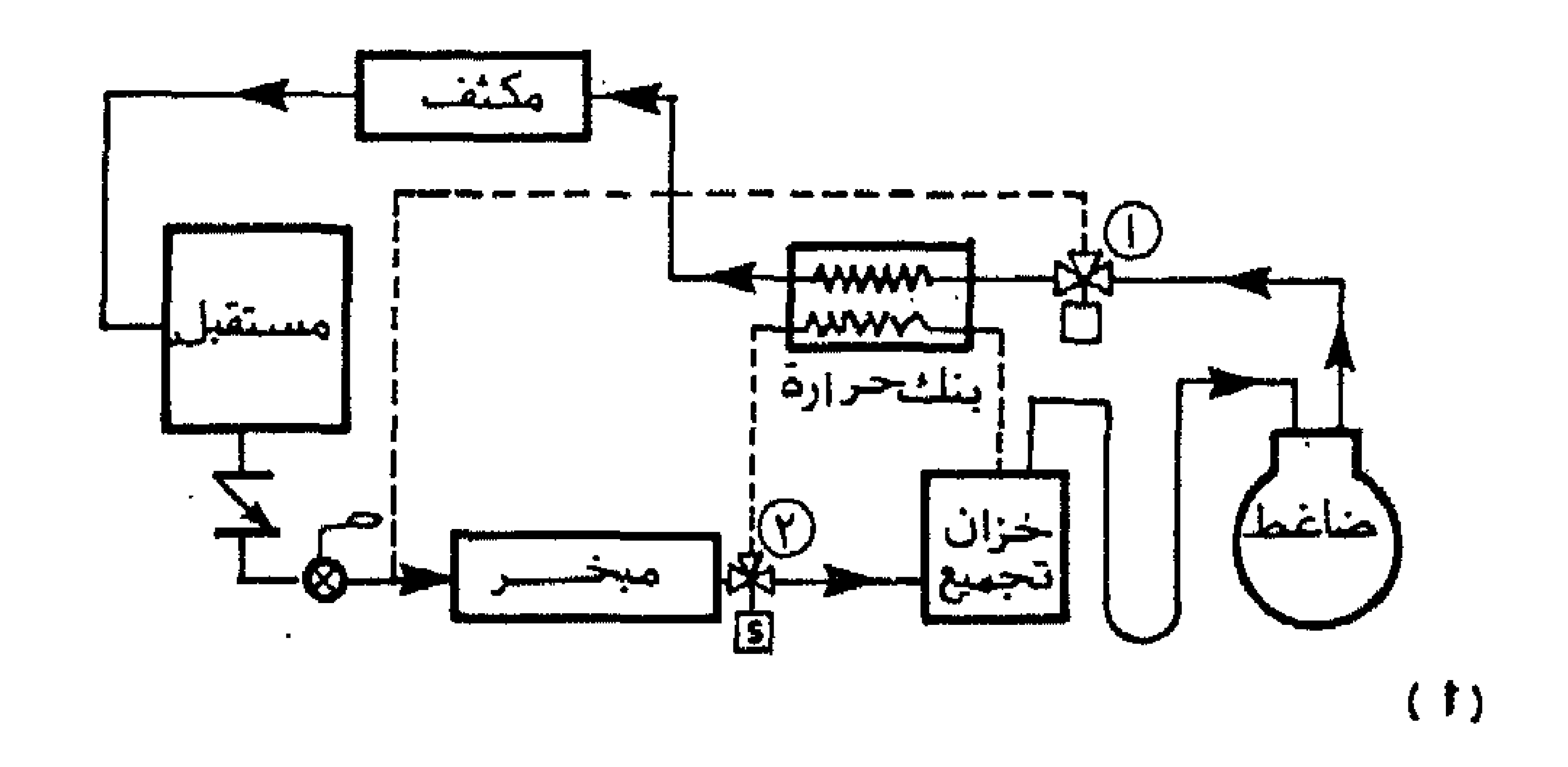


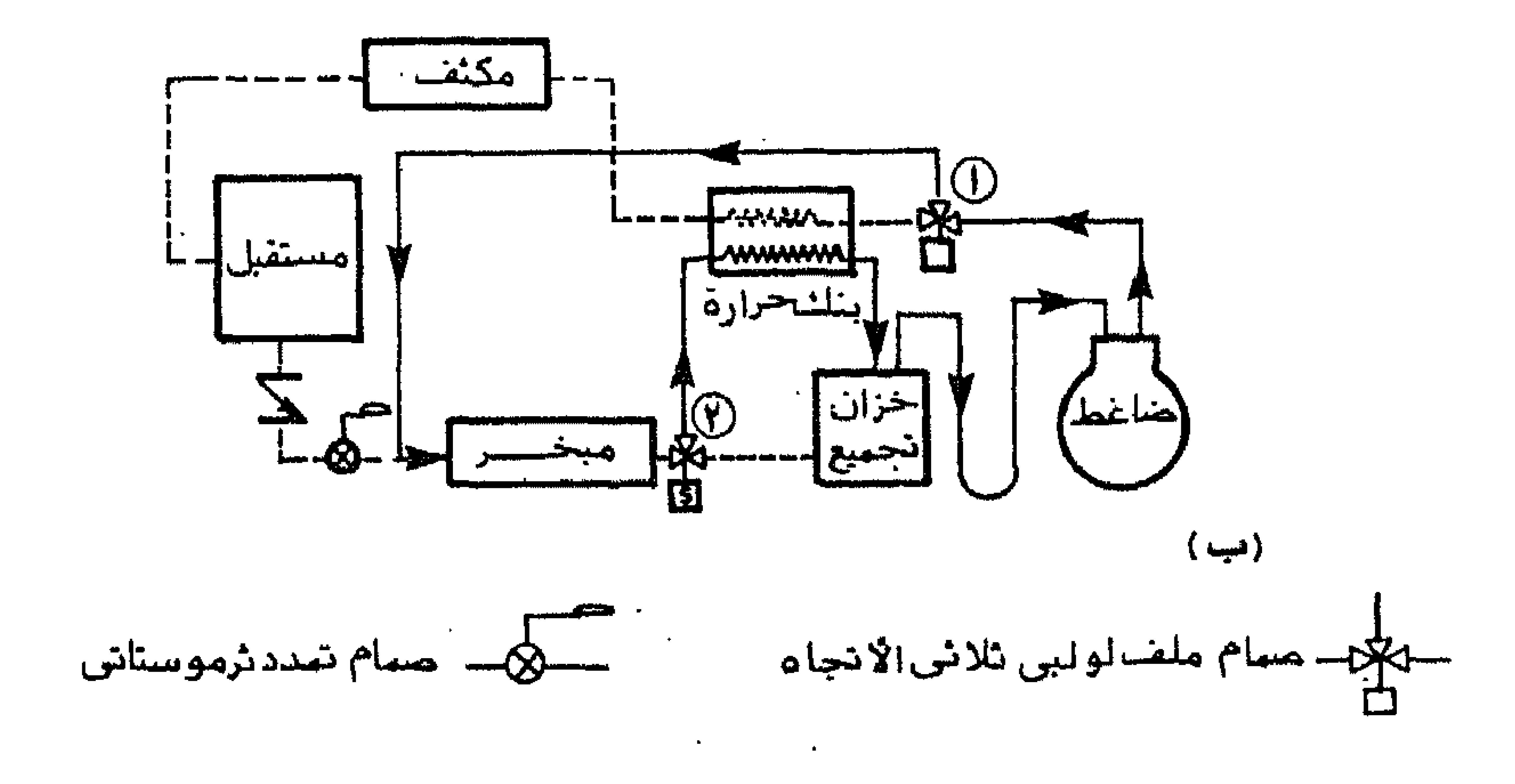
شكل ٣.٢٢ دورة مضخة حرارية لإذابة الصقيع. أ) تشغيل دورة التبريد، ب) تشغيل دورة إذابة الصقيع .

يبين شكل ٣.٢٢ دورة المضخة الحرارية لإذابة الصقيع . وفي هذه الدورة يُعْكس اتجاه سريان المبرد خلال الدورة ، فيصبح المبخر مكثفاً ، والمكثف مبخراً . ويتم هذا باستخدام صمام رباعي الاتجاه كما هو مبين بالشكل . فعند بدء دورة إذابة الصقيع ، يُعَدّل

وضع الصمام رباعي الاتجاه أوتوماتياً بحيث يسري الغاز الساخن من الضاغط إلى المبخر ، مما يذيب الصقيع به . ويحوي نظام التبريد الذي يعمل بهذه الطريقة لإذابة الصقيع على صمام تمدد للمكثف يعمل فقط عند عكس الدورة . كذلك يضم النظام صمامين لارجعيين لضمان سريان المبرد في الاتجاه الصحيح تبعاً لإيقاف أو تشغيل دورة إذابة الصقيع .

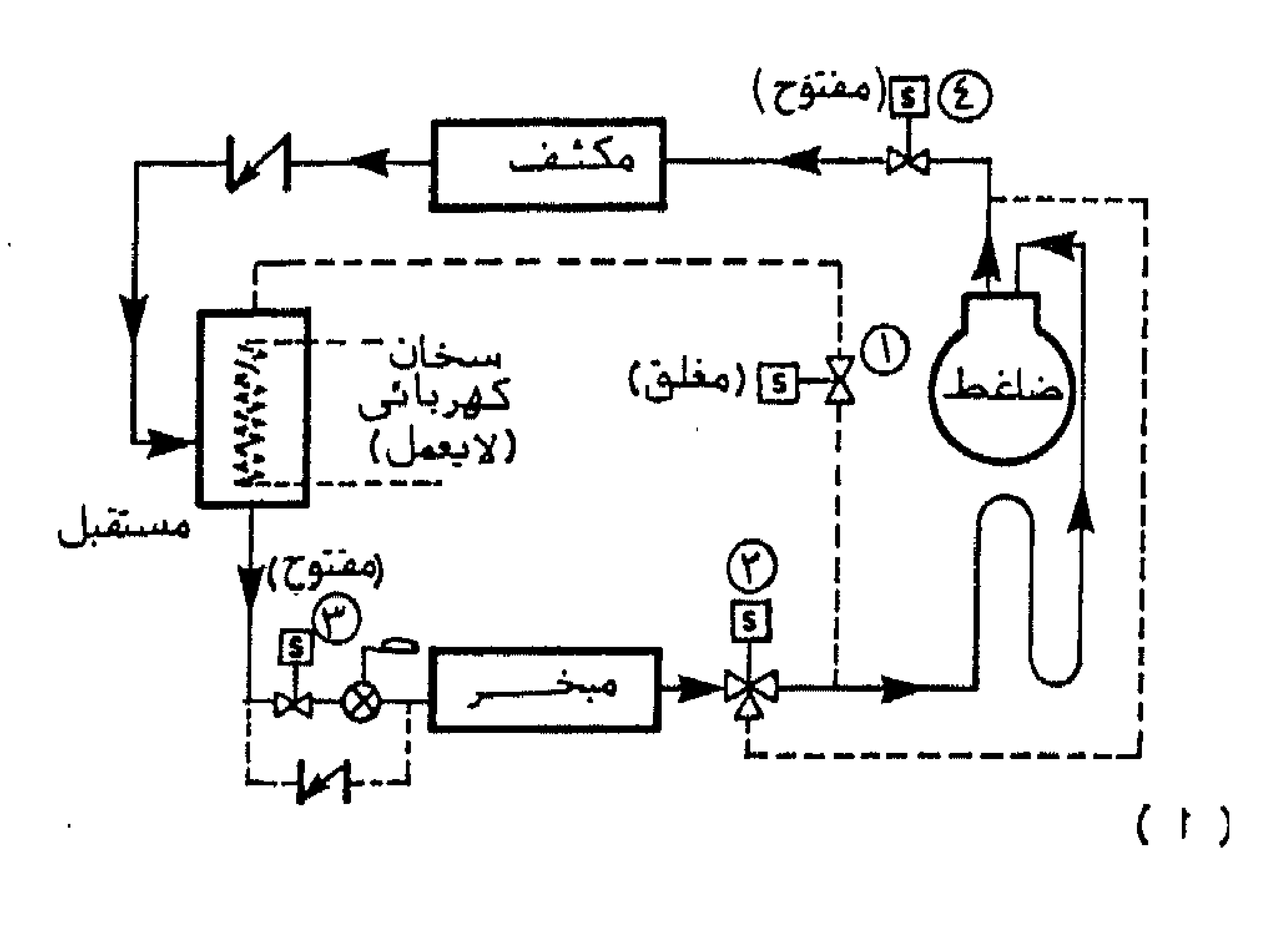
ويبين شكل ٣.٢٣ استخدام طريقة تخزين الحرارة (بنك حرارة) مع دورة إذابة الصقيع بالغاز الساخن . وفي هذه الطريقة يحوي نظام التبريد خزان ماء يتم تسخينه -

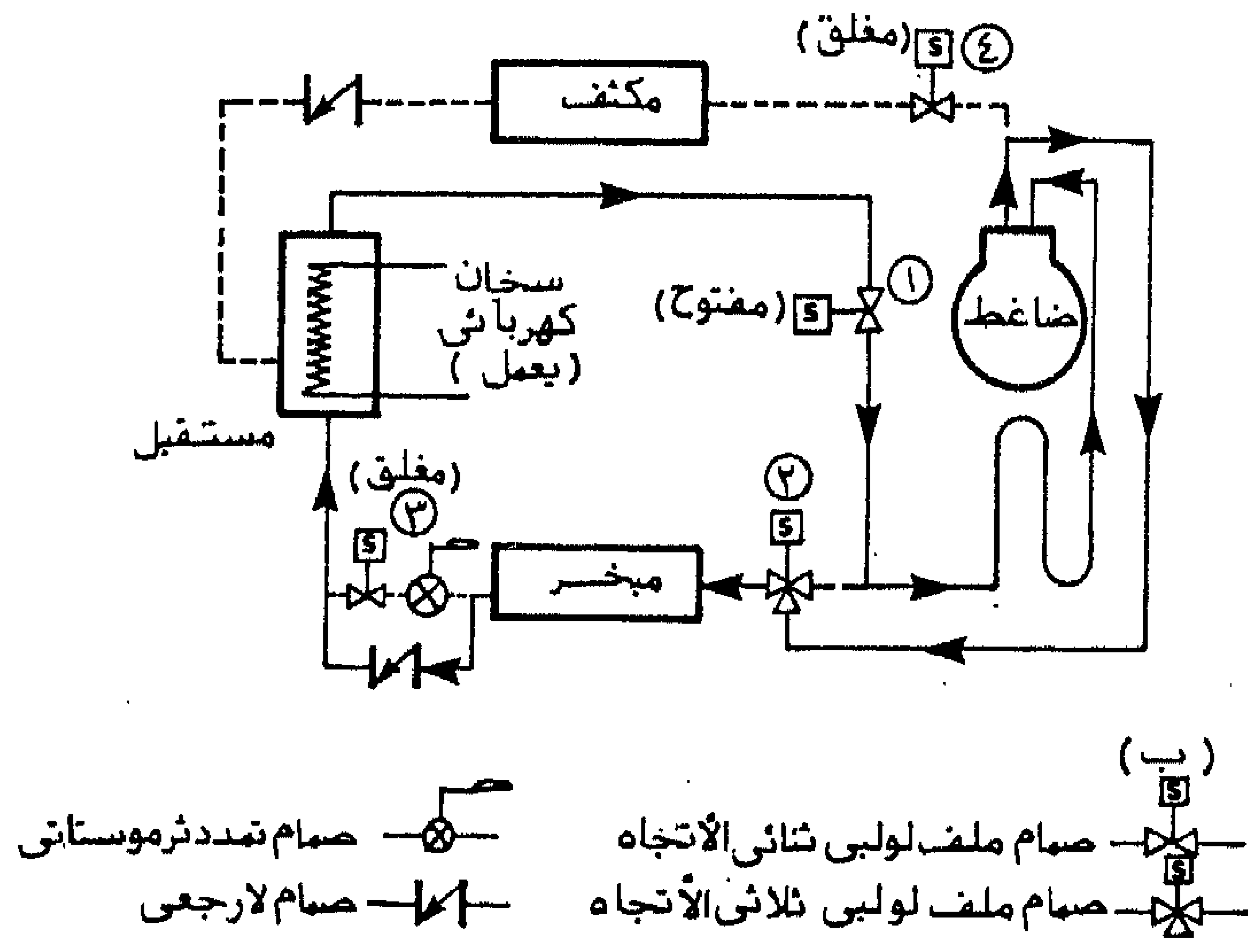




شكل ٣.٢٣ دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام بنك حرارة . (أ) تشغيل دورة التبريد ، (ب) تشغيل دورة إذابة الصقيع .

أثناء تشغيل دورة التبريد - بالغاز الساخن قبل مرور هذا الغاز إلى المكثف . عند بدء دورة إذابة الصقيع يوصل الغاز الساخن مباشرة بنقطة دخول المبخر وذلك بتعديل وضع صمام الملف اللولبي ١ . بمرور الغاز الساخن يذوب الصقيع ويتكثف الغاز إلى سائل . يمر سائل المبرد خلال صمام الملف اللولبي ٢ (بعد تعديل وضعه أوتوماتياً) إلى خزان الماء





شكل ٣,٢٤ دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام سخان كهربائي . (أ) تشغيل معتاد لدورة التبريد ، (ب) تشغيل دورة إذابة الصقيع .

(بنك الحرارة) فيتم تبخيره إلى خط سحب الضاغط . ويلزم في هذه الدورة استخدام خزان تجميع لحماية الضاغط من دخول أي قطرات سائل إليه . وبانتهاء دورة إذابة الصقيع ، يعدل وضع الصمامين ١ و ٢ إلى وضعهما الطبيعي بدورة التبريد ، وتبدأ عملية تسخين ماء الخزان الحراري مرة أخرى ، وهكذا .

يبين شكل ٣.٢٤ دورة إذابة الصقيع بطريقة الغاز الساخن باستخدام مصدر كهربائي للحمل الحراري أثناء الدورة . يوضع عنصر التسخين الكهربائي في المستقبل ، ولا يعمل هذا العنصر أثناء التشغيل المعتاد لدورة التبريد . عند بدء تشغيل دورة إذابة الصقيع يفتح صمام الملف اللولبي ١ ويغلق صماما الملف اللولبي ٣ و ٤ ، ويعدل وضع صمام الملف اللولبي ٢ ليسمح بدخول الغاز الساخن القادم من الضاغط إلى المبخر . يتكثف الغاز الساخن بالمبخر إلى سائل نتيجة إذابة صقيع المبخر ، ويخرج هذا السائل خلال الصمام غير المرجع إلى المستقبل . بتشغيل دورة إذابة الصقيع ، يصل التيار الكهربائي إلى عنصر التسخين فيعمل كحمل حراري للمستقبل ، مما ينتج عنه إمداد الضاغط ببخار المبرد - اللازم لعمل الضاغط - خلال صمام الملف اللولبي ١ . بانتهاء دورة إذابة الصقيع يقطع التيار عن عنصر التسخين الكهربائي ويغلق صمام الملف اللولبي ١ ، ويفتح صماما الملف اللولبي ٣ و ٤ ، ويعدل صمام الملف اللولبي ٢ وضعه ليصل خروج المبخر بخط سحب الضاغط . عندئذ تبدأ المكنة في العمل بدورة التبريد المعتادة .

ولمزيد من التفاصيل حول طرق إذابة الصقيع وتشغيلها ، والتحكم فيها واستخداماتها في التطبيقات المختلفة يمكن للقارئ الرجوع إلى [دوسات ١٩٨١ ، وجوزني ١٩٨٢ ، وبيتا ١٩٨٤ ، وآشراي ١٩٨٨ ، وآشراي ١٩٩٠] .

٤

المكثفات

٤.١ مقدمة

المكثف هو أحد المكونات الأساسية لأي نظام تبريد ، ففي المكثف يتم طرد الحرارة بالمعدل اللازم لضمان تشغيل دورة التبريد بالأداء الموصى به . تقسم المكثفات عموماً ، تبعاً لطريقة طرد الحرارة بها إلى المكثفات المبردة بالهواء ، والمكثفات المبردة بالماء ، والمكثفات التبخيرية المبردة بتبخير الماء بالإضافة إلى تبريدها بالهواء أيضاً . ويهدف الفصل الحالي إلى تقديم كيفية حساب الحمل الحراري بالمكثف وعرض تغير هذا الحمل مع ظروف تشغيل المكثف . كما يقدم الفصل أيضاً الأنواع المختلفة للمكثفات وتركيب كل منها ومميزات وعيوب كل نوع وطريقة انتقال الحرارة بهذه الأنواع . أيضاً ، يقدم الفصل الطرق المتبعة للتحكم في ضغط المكثف مع عرض لمميزات وعيوب كل طريقة . ويستطيع القارئ بعد الاطلاع على محتويات الفصل المقارنة بين أنواع المكثفات المختلفة واختيار أنسب هذه الأنواع ملاءمة لتطبيق ما . كما يمكن للقارئ أيضاً التعرف على ما قد يسببه الأداء غير

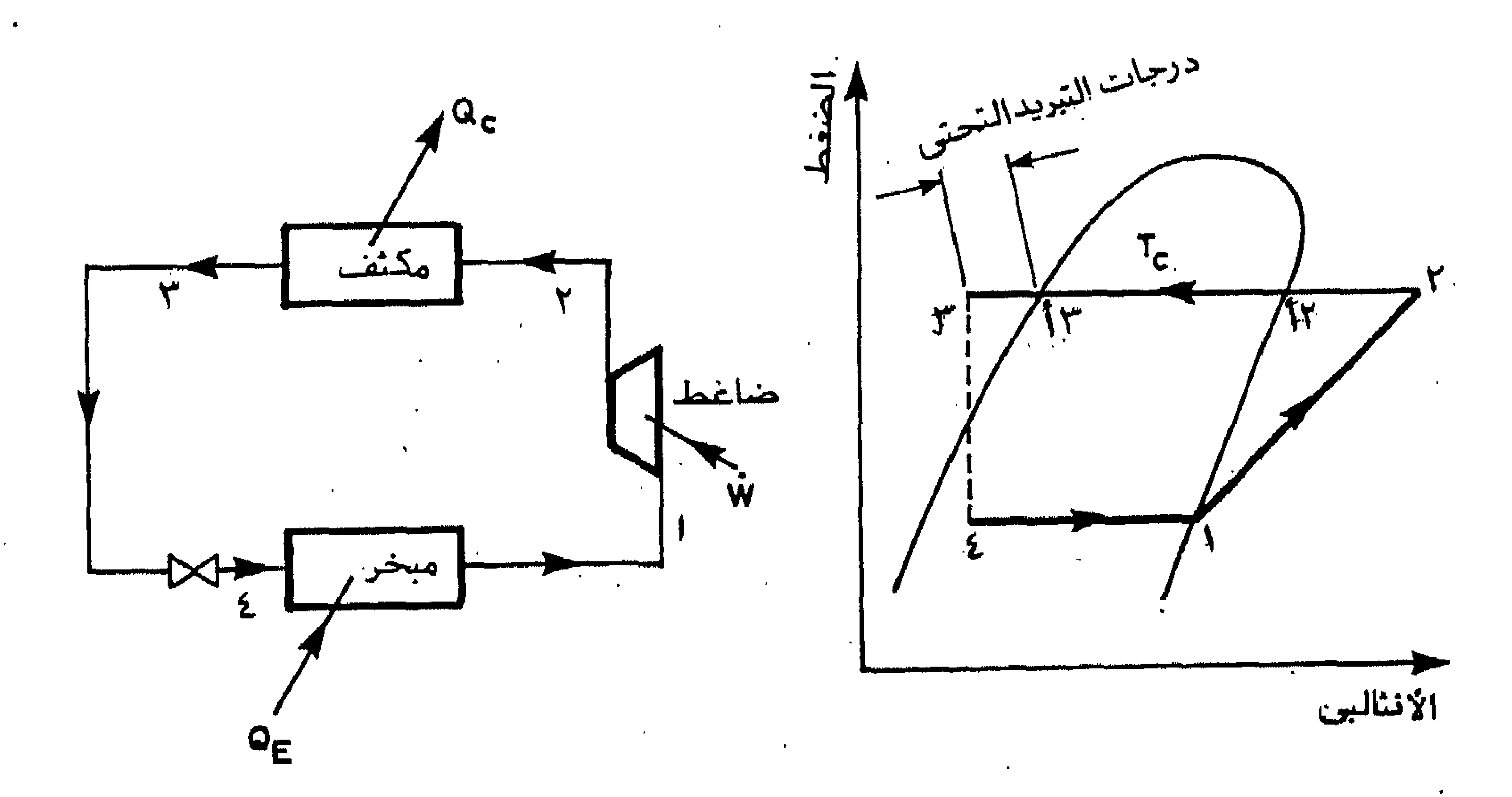
الجيد للمكثف من تأثير على أداء نظام التبريد ، وبالتالي القيام بالصيانة اللازمة للمكثف لتحسين أداء نظام التبريد .

٤.٣ الحمل الحراري للمكثف

يمثل شكل ٤.١ رسماً تخطيطياً لدورة تبريد بسيطة مع تمثيلها على خريطة الضغط – الإنثالبي . وكما هو موضح بالرسم تتم عملية طرد الحرارة بالمكثف بين الحالتين ٢ و ٣ . ويقدر الحمل الحراري الداخلي (أي محسوب من السريان داخل المكثف) تبعاً لشكل ٤.١ كما يلي

$$Q_c = \dot{m} \; (h_2 - h_3) \tag{4.1}$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المبرد خلال المكثف و h هي إنثالبي المبرد . ويقسم الحمل الحراري للمكثف إلى ثلاثة أجزاء : الجزء الأول هو إزالة التحميص وهو من الحالة ٢ إلى



شكل ٤.١ دورة تبريد بسيطة .

الحالة ٢ أ ، والجزء الثاني هو تكثيف بخار المبرد من الحالة ٢ أ إلى الحالة ٣ أ ، والجزء الثالث والأخير وهو التبريد التحتي (الدوني) لسائل المبرد (إن وجد) وهو من الحالة ٣ أ إلى الحالة ٣ . ويعتبر الجزء الثاني من الحمل الحراري هو أهم الأجزاء ويمثل معظم الحمل الحراري . ويُطْرَد الحمل الحراري Q_c من المكثف إلى الخارج بمائع إزالة حرارة يكون عادة ماء أو هواء أو كليهما (كالمكثفات التبخيرية) . عندئذ يعطى الحمل الحراري الخارجي للمكثف كما يلي

$$Q_c = U\,A\,\Delta T_m \tag{4.2}$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين المبرد داخل المكثف ومائع إزالة الحرارة خارجه ، و A هي مساحة انتقال الحرارة بالمكثف ، و ΔT_m هي الفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد داخل المكثف ومائع إزالة الحرارة خارجه .

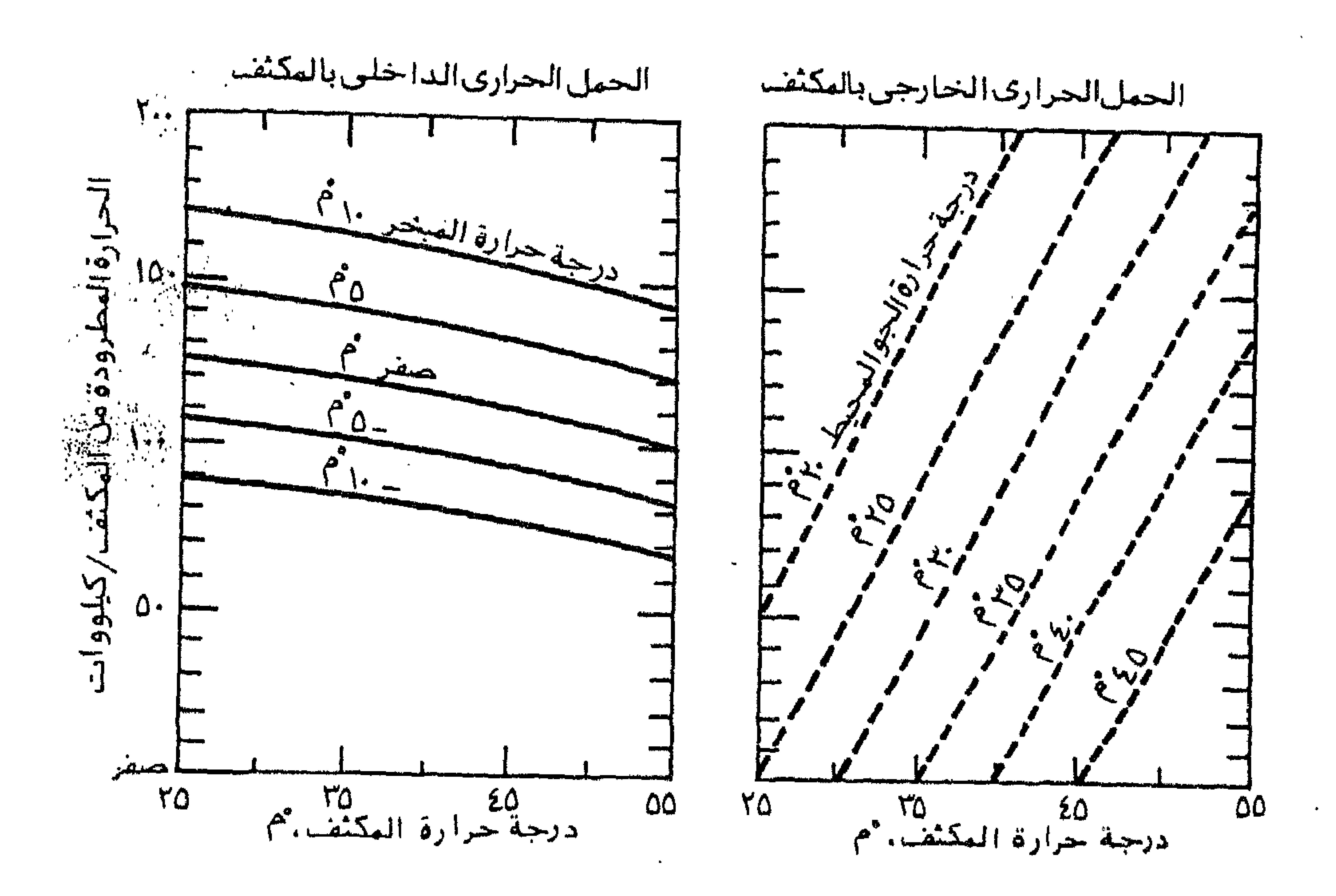
ويلزم عند ظروف الاستقرار أن يتساوى الحملان الحراريان الداخلي والخارجي المعطيان بالمعادلتين ٤.١ و ٤.٢ على التوالي ، فإذا لم يتساويا تغيرت ظروف تشغيل دورة التبريد حتى يتم هذا التساوي للحملين .

بالرجوع إلى معادلة ٤.١ وشكل ٤.١ يتغير الحمل الحراري الداخلي للمكثف بتغير درجتي حرارة المبخر والمكثف نتيجة :

أ) تغير الإنثالبي عند الدخول والخروج إلى ومن المكثف .

ب) تغير معدل سريان المبرد خلال المكثف ، حيث يتغير هذا المعدل مع درجتي حرارة المكثف والمبخر تبعاً لنوع الضاغط المستخدم في دورة التبريد.

ويبين الرسم في اليسار بشكل ٤.٢ تغير الحمل الحراري الداخلي لأحد مكثفات التبريد المستخدمة لمبرد ٢٢ وضاغط ترددي مغلق ، مع درجتي حرارة المكثف والمبخر . ويلاحظ من الرسم انخفاض قيمة الحرارة المطرودة داخلياً من المبرد بالمكثف بانخفاض درجة حرارة



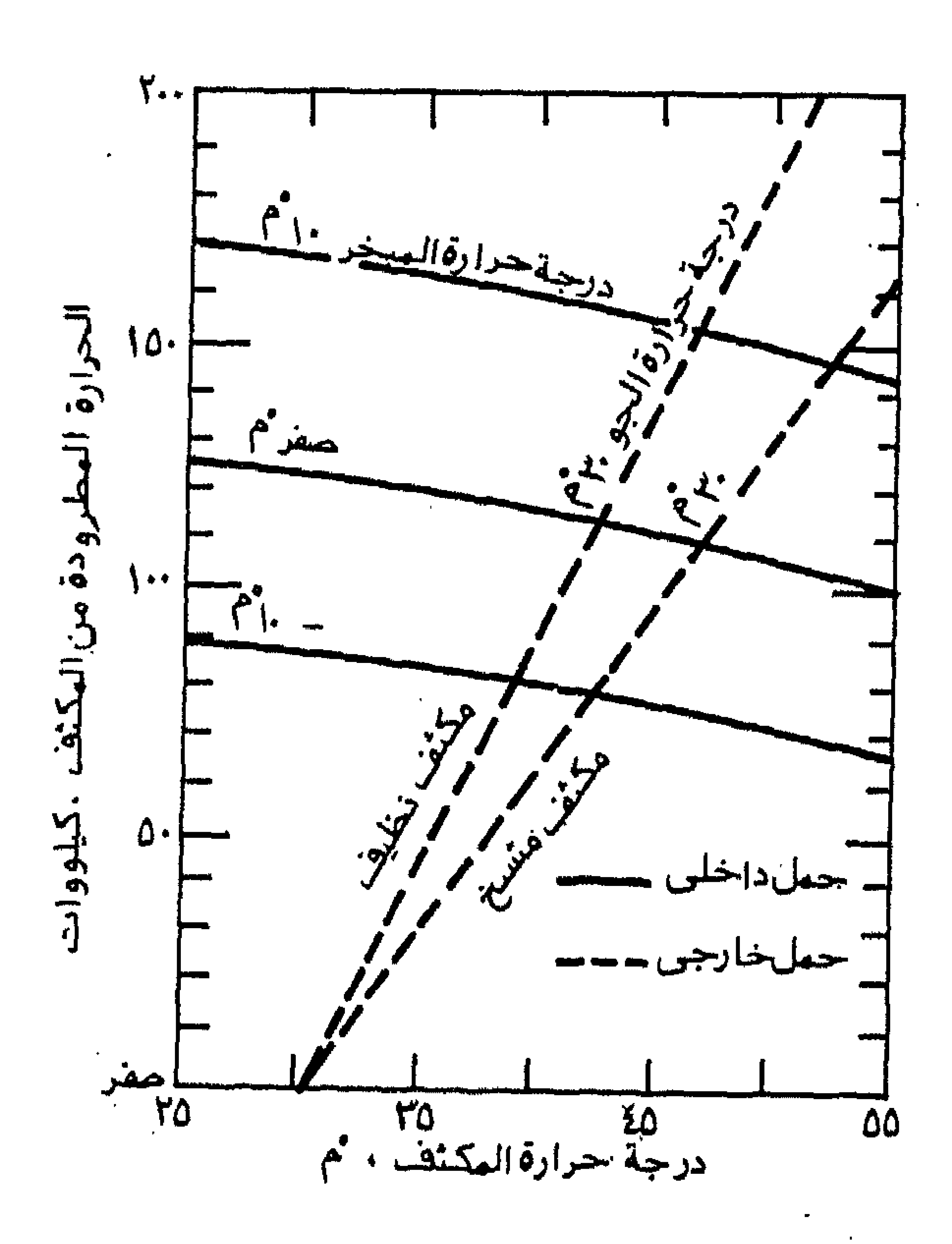
شكل ٢ . ٤ تغير الحمل الحراري الخارجي (يميناً) والحمل الحراري الداخلي (يساراً) للمكثف مع تغير درجات حرارة الجو والمكثف والمبخر . البيانات بالخريطة لمكنة تبريد تستخدم مبرد ٢٢ وضاغط ترددي مغلق ومكثف مبرد بالهواء .

المبخر و/أو ارتفاع درجة حرارة المكثف .

من معادلة ٢ . ٤ يتغير الحمل الحراري الخارجي للمكثف بتغير درجة حرارة المكثف ودرجة حرارة مائع إزالة الحرارة من المكثف ، اللتين تؤثران مباشرة في تغير ΔT_m . أيضاً يعتمد الحمل الحراري الخارجي للمكثف على حاصل الضرب UA للمكثف . ويبين الرسم إلى اليمين بشكل ٢ . ٤ زيادة الحمل الحراري الخارجي لمكثف ما (مبرد بالهواء ويستخدم

مبرد ٢٢) بارتفاع درجة حرارة المكثف و/أو انخفاض درجة حرارة الجو ، عند ثبات قيمة UA .

وتُحَدَّد درجة حرارة المكثف بتساوي الحمل الحراري الداخلي والحمل الحراري الخارجي للمكثف عند ظروف التشغيل المختلفة . ويبين شكل ٤.٣ ارتفاع درجة حرارة المكثف من ٣٨ °م إلى ٤٢.٥ °م ثم إلى ٤٧ °م إذا ارتفعت درجة حرارة المبخر من -١٠°م



شكل ٤.٣ درجة حرارة المكثف عند توازن الحمل الحراري الداخلي والحمل الحراري الخارجي لمكثف نظيف وآخر متسخ . البيانات بالخريطة لمكنة تبريد تستخدم مبرد ٢٢ مع ضاغط ترددي مغلق ومكثف مُبَرَّد بالهواء .

إلى صفر °م ثم إلى ١٠ °م ، إذا كان سطح المكثف نظيفاً . فإذا كان سطح المكثف متسخاً ، أصبحت درجة حرارة المكثف على التوالي هي ٤٢.٥ °م و ٤٧ °م و ٥٣ °م . وتُعْزَى هذه الزيادة في درجة حرارة المكثف إلى اتساخ سطحه مما يخفض قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي U بالمعادلة ٤.٢ وبالتالي يقل ميل خط الحمل الحراري الخارجي كما هو موضح بشكل ٤.٣

٤.٣ معامل طرد الحرارة للمكثف

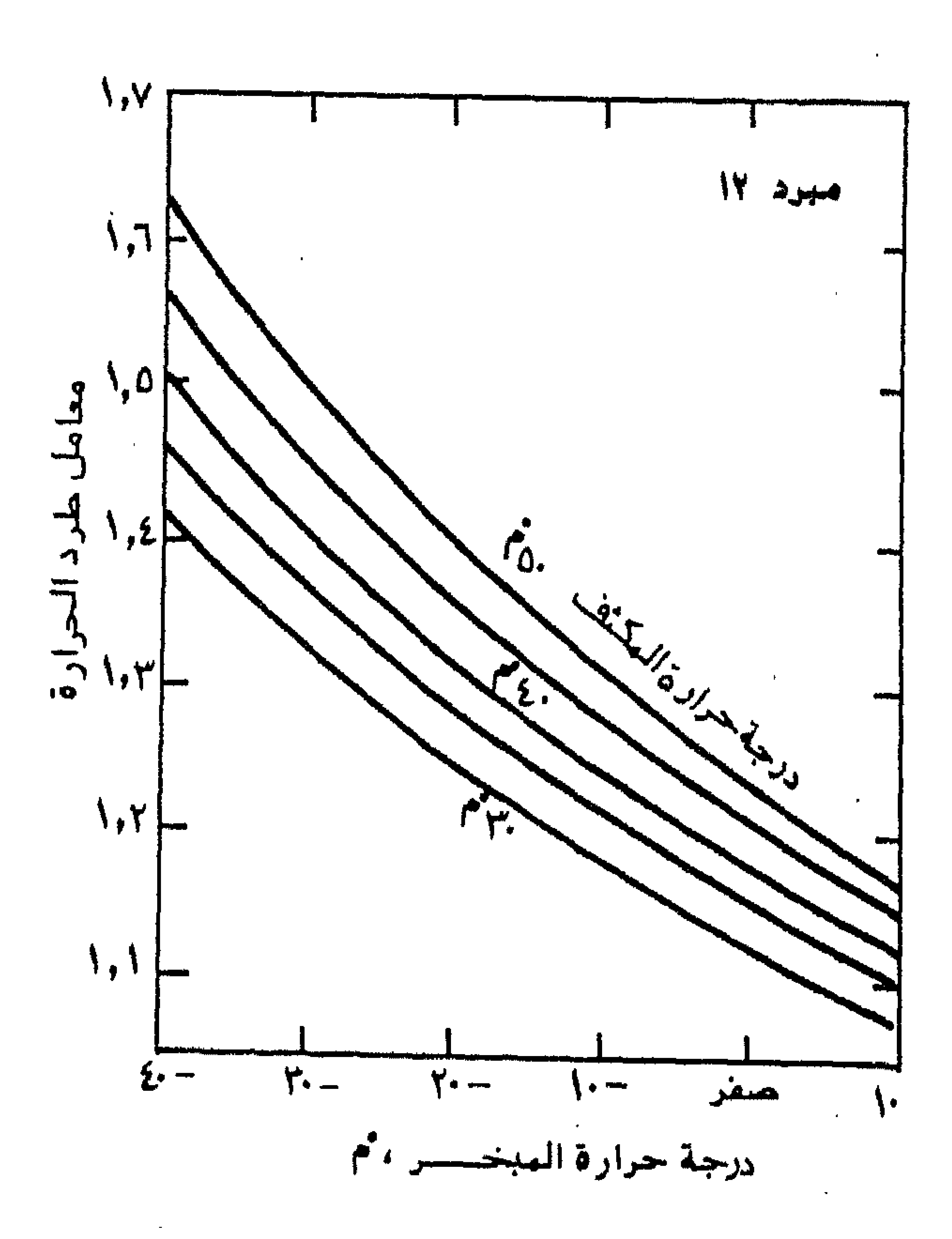
يفضل معظم مصممي نظم التبريد ، التعبير عن الحمل الحراري للمكثف Q_c بدلالة حمل التبريد بالمبخر Q_E . لذا يُعَرّف معامل طرد الحرارة HRF كما يلي

$$HRF = \frac{Q_c}{Q_E} \tag{4.3}$$

ويتغير الحمل الحراري للمكثف وكذلك معامل طرد الحرارة (أي الحمل الحراري لكل وحدة تبريد) مع تغير درجة حرارة المبخر وكذلك مع تغير درجة حرارة المكثف ، فيزيد الحمل الحراري للمكثف وكذلك يزيد معامل طرد الحرارة بانخفاض درجة حرارة المبخر ، أو ارتفاع درجة حرارة المكثف ، أو زيادة نسبة الانضغاط بالضاغط (أي نسبة ضغط المكثف إلى ضغط المبخر) كما هو مبين بشكل ٤.٤ لمبرد ١٢ .

مثال ٤.١

دورة تبريد بسيطة كالمبينة بشكل ٤.١ تستخدم مبرد ٢٢ بين درجة حرارة مبخر قدرها -١٠ °م ودرجة حرارة مكثف قدرها ٥٠ °م . بفرض حالة تشبع لسائل المبرد عند الخروج من المكثف ، وحالة تشبع لخروج البخار من المبخر ، وانضغاط أيزونتروبي



شكل ٤.٤ تغيير معامل طرد الحرارة مع درجة حرارة المبخر ودرجة حرارة المكثف لمبرد ١٢[أشراي ١٩٨٣].

بالضاغط . ادرس تغير معامل طرد الحرارة لهذه الدورة مع :

أ) تغيير درجة حرارة المكثف بين ٣٠ °م إلى ٧٠ °م

ب) تغيير درجة حرارة المبخر بين - ٣٠ °م و + ١٠ °م

جـ) تغير نسبة الانضغاط بالضاغط للحالتين أ و ب عاليه .

الحل

يحسب معامل طرد الحرارة للدورة من معادلة ٣.٤ كما يلي (انظر شكل ٤.١)

$$HRF = \frac{Q_c}{Q_E} = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$

تقدر قيمة الإنثالبي h من ملحق أ ، ويبين جدول ٤.١ ملخص حسابات معامل طرد الحرارة عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المكثف ، وقيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر ، وقيم مختلفة لنسبة الانضغاط بالضاغط . ويتضح من الجدول الآتي :

جدول ٤.١ حساب معامل طرد الحرارة لمثال ٤.١

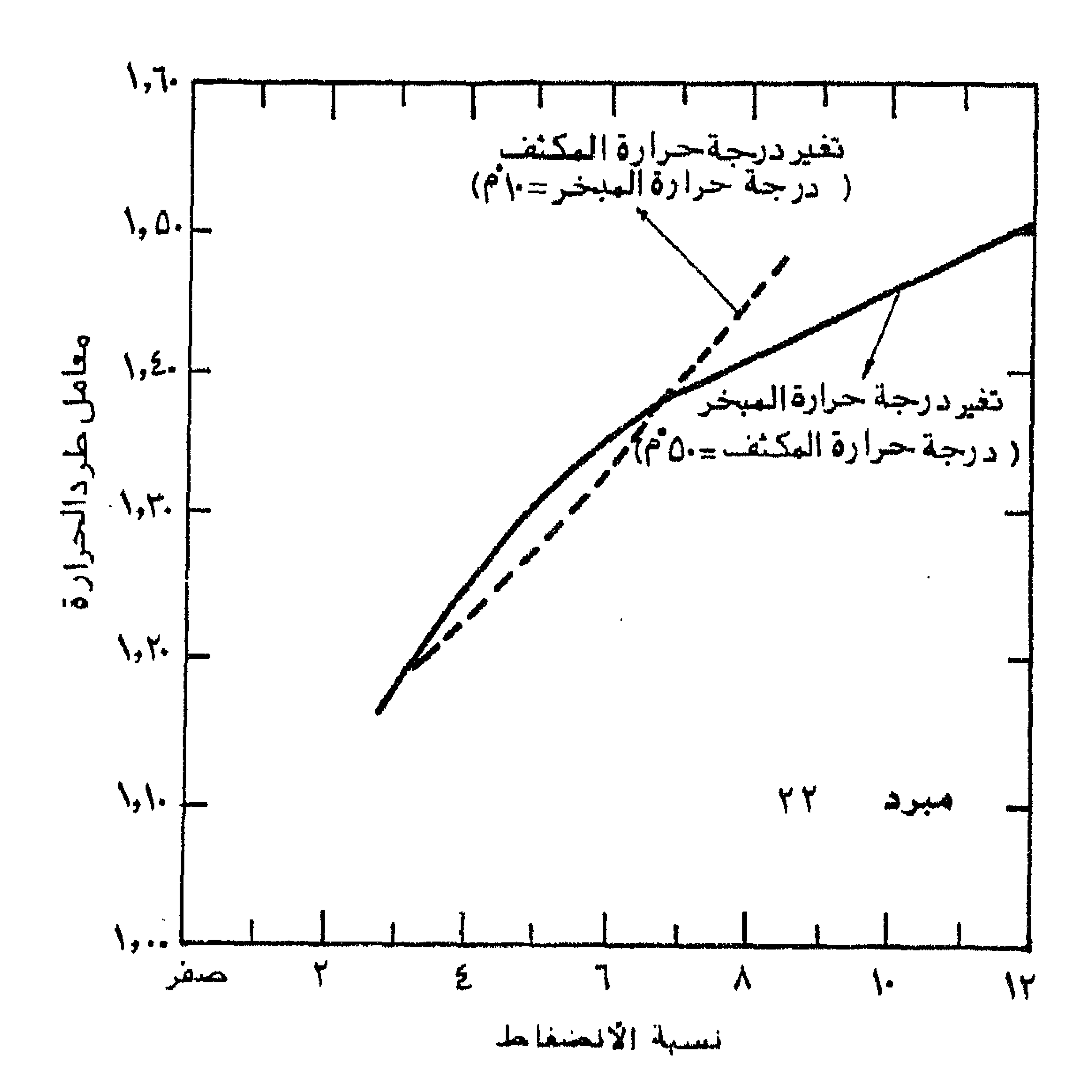
درجة الحرارة °م		الضغط ، كيلوبسكال/م^٢		نسبة	الإنثالبي ، كيلوجول/كجم			معامل طرد الحرارة
المكثف	المبخر	المكثف	المبخر	الانضغاط	h_1	h_2	h_3	HRF
٣٠	-١٠	١١٩٢.١	٣٥٤.٧٤	٣.٣٦	٤٠٠.٨٣	٤٣٣.٠٠	٢٣٦.٠٠	١.٢٠
٤٠	-١٠	١٥٣٤.٠٠	٣٥٤.٧٤	٤.٣٢	٤٠٠.٨٣	٤٣٧.٠٠	٢٤٩.٤٠	١.٢٤
٥٠	-١٠	١٩٤٣.٢	٣٥٤.٧٤	٥.٤٨	٤٠٠.٨٣	٤٤٢.٠٠	٢٦٣.٠٢	١.٣٠
٦٠	-١٠	٢٤٢٧.٩	٣٥٤.٧٤	٦.٨٤	٤٠٠.٨٣	٤٤٨.٠٠	٢٧٧.٤١	١.٣٨
٧٠	-١٠	٢٩٩٧.٥	٣٥٤.٧٤	٨.٤٥	٤٠٠.٨٣	٤٥٣.٠٠	٢٩٢.٨٨	١.٤٨
٥٠	-٣٠	١٩٤٣.٢	١٦٣.٩١	١١.٨٥	٣٩٢.٥٢	٤٥٨.٠٠	٢٦٣.٠٢	١.٥١
٥٠	-٢٠	١٩٤٣.٢	٢٤٥.٣١	٧.٩٢	٣٩٦.٧٩	٤٥٢.٠٠	٢٦٣.٠٢	١.٤١
٥٠	-١٠	١٩٤٣.٢	٣٥٤.٧٤	٥.٤٨	٤٠٠.٨٣	٤٤٢.٠٠	٢٦٣.٠٢	١.٣٠
٥٠	صفر	١٩٤٣.٢	٤٩٧.٩٢	٣.٩٠	٤٠٤.٥٩	٤٣٨.٠٠	٢٦٣.٠٢	١.٢٤
٥٠	١٠	١٩٤٣.٢	٦٨٠.٩١	٢.٨٥	٤٠٨.٠٣	٤٣٢.٠٠	٢٦٣.٠٢	١.١٧

أ) زيادة معامل طرد الحرارة بارتفاع درجة حرارة المكثف

ب) زيادة معامل طرد الحرارة بانخفاض درجة حرارة المبخر

جـ) زيادة معامل طرد الحرارة بارتفاع قيمة نسبة الانضغاط بالضاغط . ويبين شكل ٤.٥ هذا التغير عند ثبات درجة حرارة المكثف أو عند ثبات درجة حرارة المبخر . ويلزم التنويه بالآتي :

أ) شكل ٤.٥ يمثل علاقة نمطية لتغير معامل طرد الحرارة مع نسبة الانضغاط لمبردات أخرى عند ظروف تشغيل مختلفة .



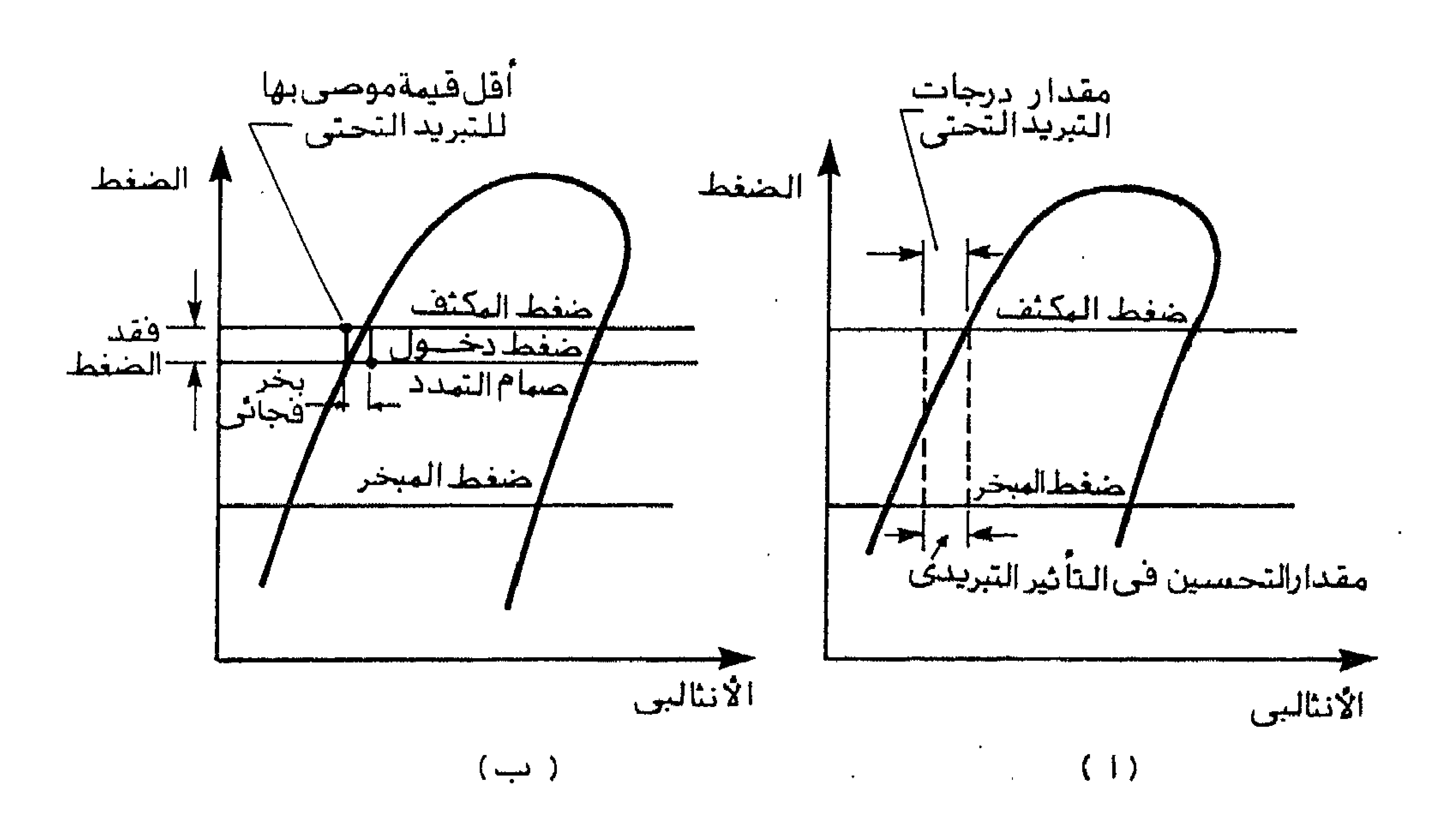
شكل ٤.٥ تغير معامل طرد الحرارة مع نسبة الانضغاط لمثال ٤.١ .

ب) يجب على المصمم اختيار أقل درجة حرارة ممكنة بالمكثف وكذلك أعلى درجة حرارة ممكنة بالمبخر للمحافظة على معامل طرد حرارة منخفض مما يعني صغر مساحة سطح انتقال الحرارة بالمكثف المطلوب اختياره .

٤.٤ التبريد التحتي لسائل المبرد

تحتاج بعض نظم التبريد إلى تبريد تحتي لسائل المبرد قبل الدخول إلى صمام التمدد . ويستخدم هذا التبريد التحتي لواحد أو أكثر من الأغراض الآتية :

أ) زيادة التأثير التبريدي بالمبخر وبالتالي خفض قدرة الانضغاط بالضاغط لكل كيلووات تبخير بالمبخر (أنظر شكل ٦.٤) .



شكل ٦.٤ التبريد التحتي لسائل المبرد . (أ) تحسين التأثير التبريدي بالمبخر نتيجة التبريد التحتي ، (ب) أقل كمية موصى بها للتبريد التحتي للتغلب على فقد الضغط قبل الدخول لصمام التمدد.

ب) منع حدوث بخر فجائي (ومضي) نتيجة فقد الضغط في خط السائل بين المكثف وصمام التمدد . ويسبب هذا البخر فقد التحكم للصمام ، وتغير معدل سريان المبرد خلال الصمام مقارنة بقيمة التصميم (أنظر شكل ٤.٦) .

جـ) التغلب على فقد الضغط الناشئ عن صعود سائل المبرد إلى المبخر ، إذا كان مستوى المبخر أعلى من مستوى المستقبل ، لضمان عدم تبخر المبرد بالأنابيب الواصلة إلى المبخر.

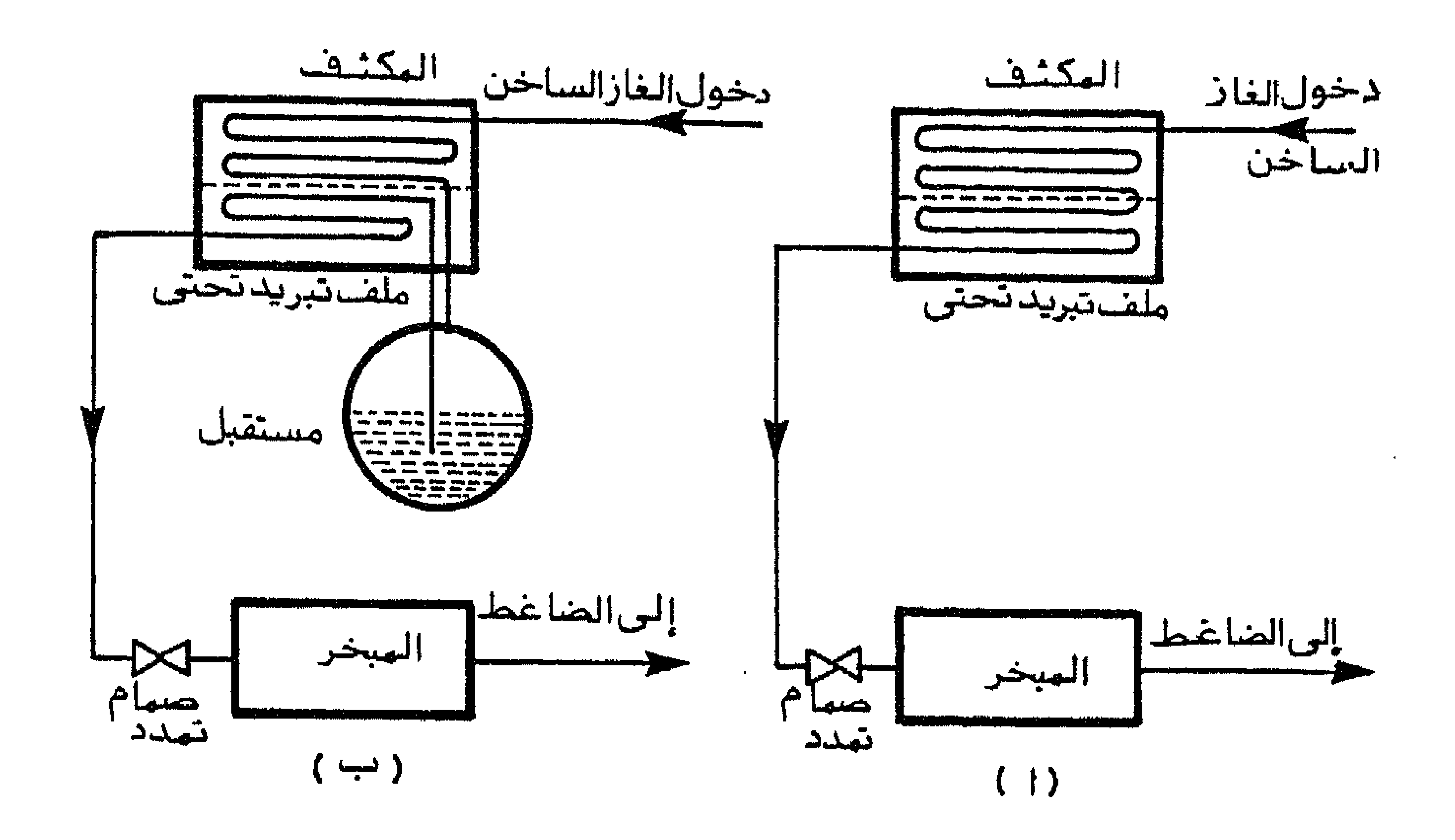
ونتيجة للسببين الثاني والثالث عاليه يجب ألا يقل مقدار التبريد التحتي عن الفرق بين درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المكثف أو ضغط المستقبل (في النظم التي تستخدم مستقبلاً) ودرجة حرارة التشبع عند ضغط الدخول إلى صمام التمدد . لذا تشمل المكثفات التي تعمل بنظم التبريد التحتي لسائل المبرد ملفاً خاصاً لهذا الغرض . ويثبت هذا الملف بالقرب من دخول مائع التبريد (الهواء أو الماء) إلى المكثف . ويجب مراعاة أن يتم التبريد التحتي في النظم التي تستخدم مستقبلاً بعد الخروج من المستقبل لضمان الاستفادة الكاملة من مقدار التبريد التحتي لسائل المبرد ، وذلك كما هو موضح بشكل ٤.٧ .

وتستخدم نظم الهالوكربونات عادة تبريداً تحتياً . إلا أن نظم الأمونيا لا تستخدم هذا التبريد لعدة أسباب منها الآتي :

أ) كبر الحرارة الكامنة لتبخير الأمونيا مما يعني أن مقدار البخر الفجائي الناتج عن فقد الضغط يمثل قدراً ضئيلاً من سريان السائل ، وأن مقدار التحسن في التأثير التبريدي بالمبخر يصبح ضئيلاً أيضاً .

ب) عدم استخدام الأمونيا لنظم التمدد المباشر الشائعة الاستخدام في نظم الهالوكربونات.

جـ) صغر كثافة سائل الأمونيا مما يعني صغر فقد ضغط سائل الأمونيا عند الصعود إلى مبخر في مستو أعلى من مستوى المستقبل .



شكل ٤.٧ موقع ملف التبريد التحتي بالمكثف . (أ) بدون استخدام مستقبل ، (ب) باستخدام مستقبل

٤.٥ درجة حرارة المكثف

بينا في جزء سابق اعتماد درجة حرارة المكثف على كل من الحمل الحراري الداخلي للمكثف والحمل الحراري الخارجي للمكثف . ويؤدي ارتفاع درجة حرارة التصميم للمكثف مع بقاء ظروف التشغيل الأخرى ثابتة إلى الآتي ، كما هو مبين بشكل ٤.٨ :

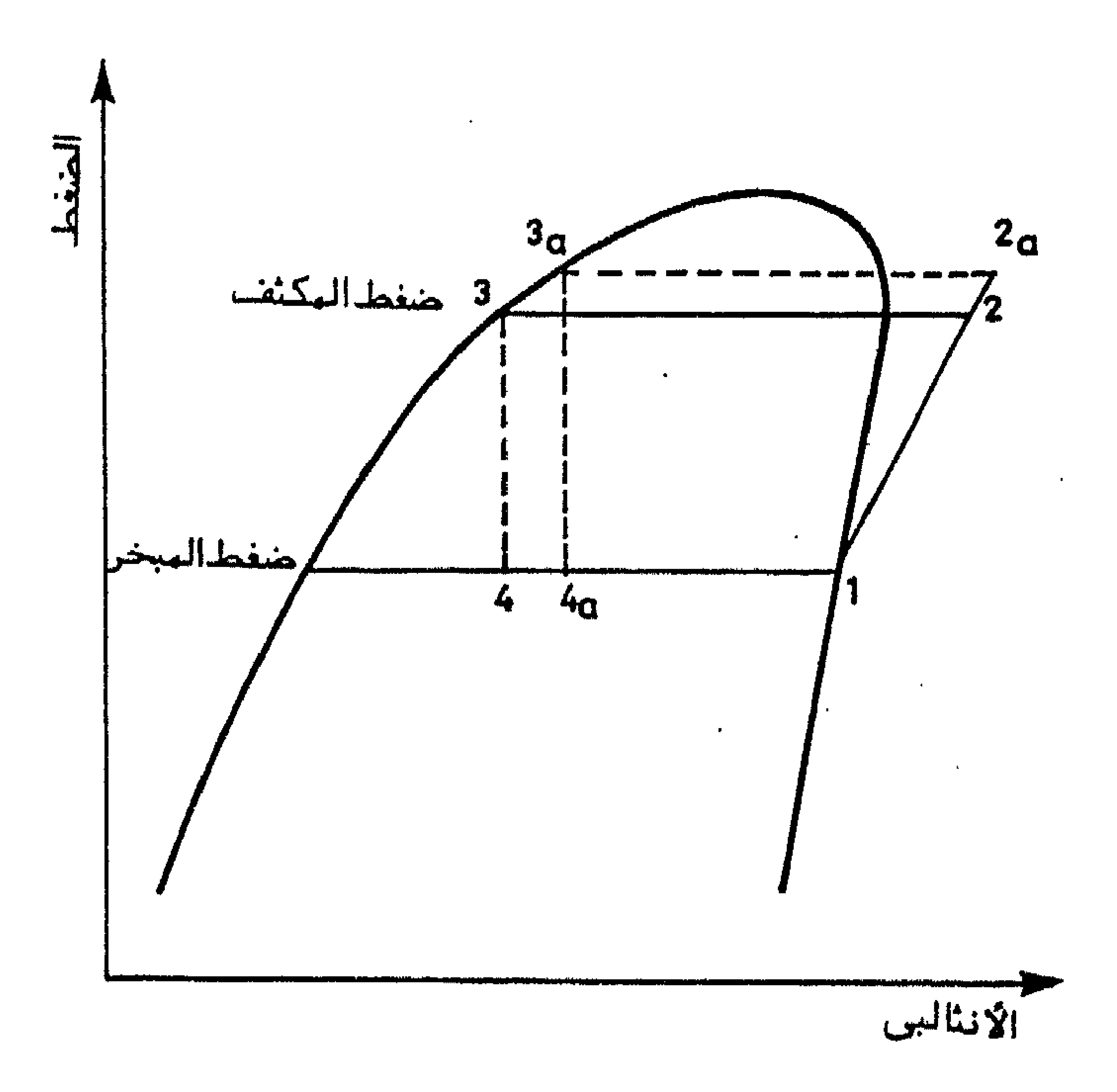
أ) ارتفاع ضغط المكثف مما يعني استخدام مواسير وأنابيب بسمك جدار أكبر نسبياً ، أي زيادة التكلفة الأولية للمكثف .

ب) ارتفاع درجة حرارة الطرد من الضاغط مما يعني زيادة احتمال تحلل زيت التزييت المحمول ببخار المبرد في نظم الهالوكربونات .

جـ) انخفاض التأثير التبريدي بالمبخر .

د) زيادة القدرة اللازمة للانضغاط بالضاغط .

هـ) انخفاض معامل أداء دورة التبريد نتيجة للبندين جـ و د عاليه .



شكل ٤.٨ تأثير تغير درجة حرارة المكثف مع بقاء باقي المتغيرات الأخرى ثابتة بدورة التبريد .

و) انخفاض معدل طرد الحرارة من المكثف (أي انخفاض حمله الحراري) . فبرغم أن ميل منحنى التشبع للسائل أقل من ميل الخطوط ثابتة الأنتروبية إلا أن نتيجة البند جـ عاليه فإن المحصلة تصبح زيادة معامل طرد الحرارة للمكثف .

ويجب على المصمم أن يعمل دائماً على خفض قيمة ضغط التصميم للمكثف لخفض التكلفة الأولية وتكلفة التشغيل لنظام التبريد .

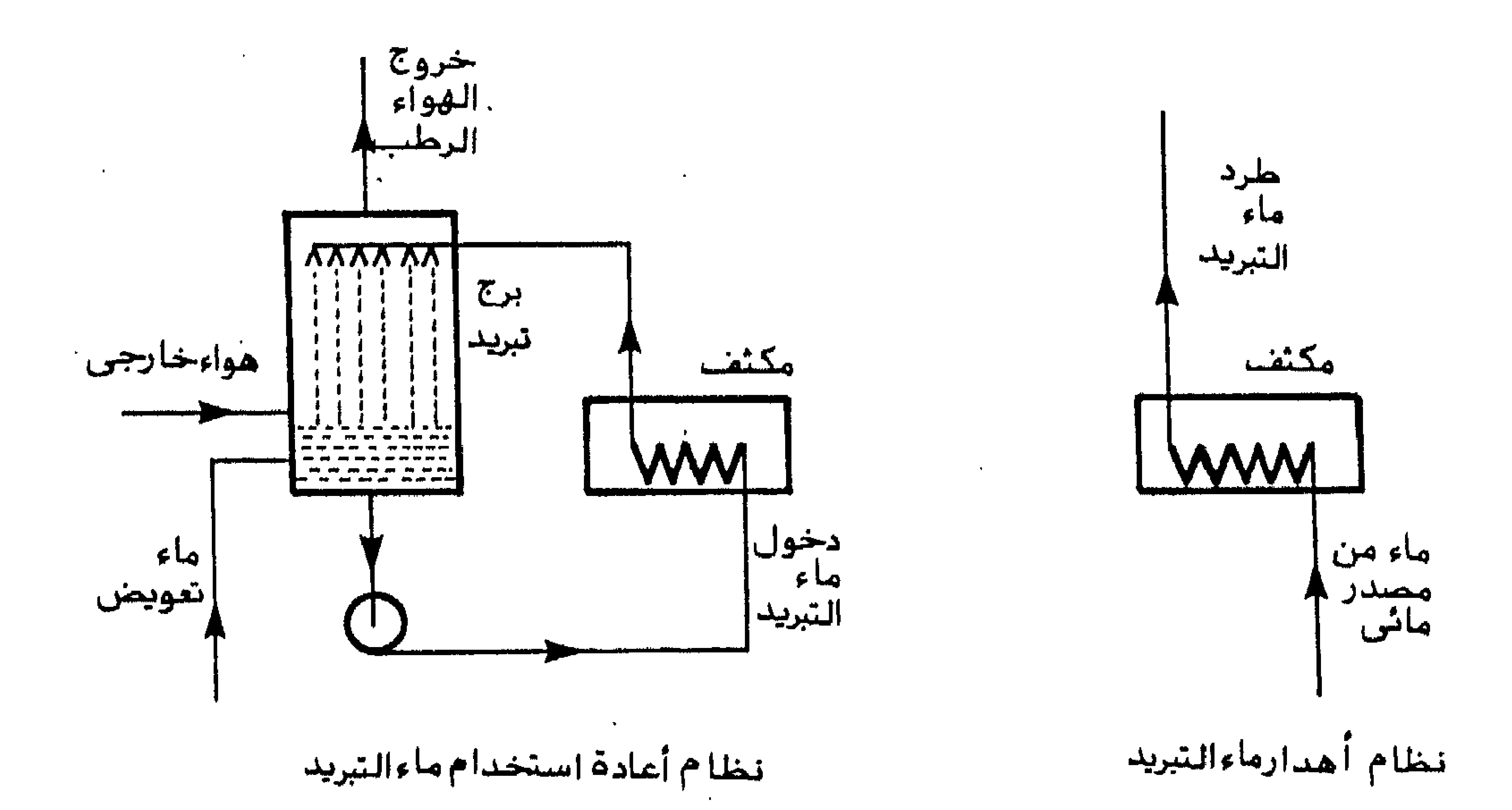
وبتشغيل دورة التبريد يتغير ضغط المكثف ، ولا ينتج عن ارتفاع ضغط المكثف نفس التأثيرات السابقة نظراً لتغير ظروف التشغيل الأخرى عن ظروف التصميم ، وسيناقش هذا الموضوع بتفصيل أكبر في الجزء الخاص بالتحكم في ضغط المكثف فيما بعد في الفصل الحالي .

٤.٦ المكثفات المبردة بالماء

٤.٦.١ نظم إمداد المكثف بالماء

هناك نظامان لإمداد المكثف بالماء هما : نظام إهدار الماء ونظام إعادة استخدام الماء . ففي النظام الأول يستخدم الماء لمرة واحدة في تبريد المكثف دون إعادة استخدامه مرة أخرى . ويُستَخْدَم هذا النظام مع المكثفات الصغيرة نسبياً وعندما تكون تكلفة الماء زهيدة . فإذا زادت تكلفة الماء عن الحد الاقتصادي لتشغيل المكثف وجب استخدام برج تبريد لتبريد الماء الخارج من المكثف قبل إعادة استخدامه مرة أخرى . ويُستَخْدَم الهواء لتبريد الماء في أبراج التبريد . ويوضح شكل ٤.٩ نظامي إمداد الماء للمكثفات .

وتعتمد درجة حرارة المكثف في أي من النظامين على درجة حرارة الماء الداخل إلى المكثف وكذلك معدل سريان الماء . فتنخفض هذه الدرجة بانخفاض درجة حرارة الماء



شكل ٤.٩ نظم إمداد المكثف بماء التبريد.

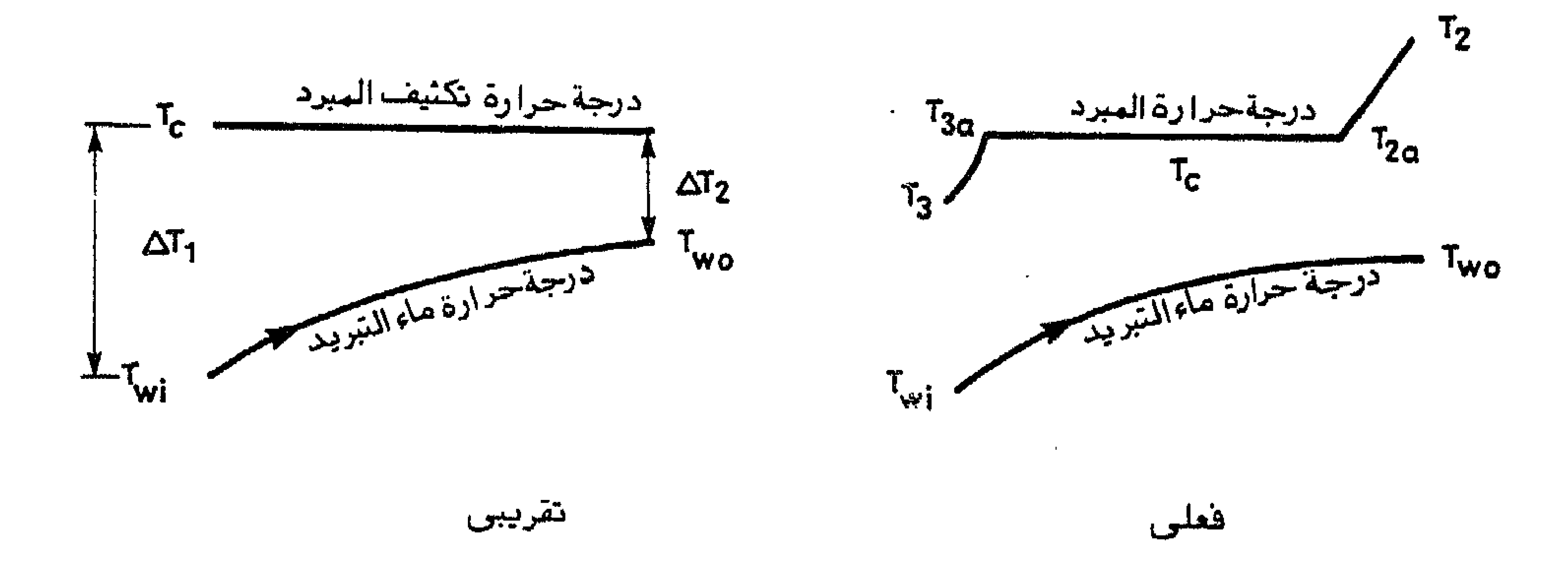
الداخل للمكثف و/أو زيادة معدل سريان الماء . وتؤخذ عادة درجة حرارة المكثف أعلى من درجة حرارة الماء الخارج منه بحوالي ٤ إلى ٥ ° م . كذلك يؤخذ عادة فرق درجتي حرارة الماء الداخل إلى المكثف والخارج منه حوالي من ٣ إلى ٦ ° م تبعاً لمعدل سريان الماء إلى المكثف. ويحدد معدل سريان الماء إلى المكثف تبعاً للموازنة بين : تحسين عملية انتقال الحرارة (بزيادة سرعة الماء) بين ماء التبريد والمبرد داخل المكثف ، ومنع الترسيب (بزيادة سرعة الماء) داخل أنابيب المكثف ، وخفض تكلفة ضخ الماء (بخفض معدل سريانه) ، وتآكل أنابيب المكثف الناتج عن السرعات العالية لسريان الماء . ويؤخذ عادة معدل سريان الماء إلى المكثف حوالي ٠.٠٢٥ لتر/ث لكل كيلووات تبريد في نظم إهدار الماء ، وحوالي من ٠.٠٠٤ إلى ٠.٠٠٦ لتر/ث لكل كيلووات تبريد في نظم إعادة استخدام ماء التبريد (نظم أبراج التبريد) ، [دوسات ١٩٨١ ، وهاريس ١٩٨٣] .

٤.٦.٣ انتقال الحرارة في المكثفات المبردة بالماء

بينا فيما سبق أن الحمل الحراري الخارجي للمكثف يعطي بالمعادلة ٤.٢ كما يلي

$$Q_c = U\,A\,\Delta T_m \tag{4.4}$$

حيث تم تعريف الرموز المختلفة فيما سبق . ويبين شكل ٤.١٠ توزيع درجتي حرارة المبرد وماء التبريد داخل المكثف تبعاً لدورة التبريد المعطاه بشكل ٤.١ . ويمثل التوزيع إلى يمين الشكل التوزيع الفعلي لدرجتي الحرارة ، ولكن نظراً لأن معدل انتقال الحرارة خلال عملية التكثيف يمثل غالبية الحمل الحراري بالمكثف كما بينا سابقاً فإنه يمكن تقريب توزيع درجات الحرارة على سطح انتقال الحرارة كما هو مبين في الجزء الأيسر من الشكل ، دون تأثر الحمل الحراري بقدر محسوس . عندئذ يُعَرّف فرق درجات الحرارة ΔT_m بأنه القيمة المتوسطة اللوغاريتمية لفرق درجات الحرارة ، أي أن



شكل ٤.١٠ تغير درجتي حرارة المبرد وماء التبريد على جانبي سطح انتقال الحرارة بالمكثف (فعلي وتقريبي) .

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln (\Delta T_1 - \Delta T_2)} \tag{4.5}$$

وتتراوح قيمة هذا الفرق عملياً بين حوالي ٦ إلى ١١° م ، تبعاً لظروف تشغيل وتصميم المكثف .

تحسب قيمة المعامل الكلي لانتقال الحرارة U في المعادلة ٤.٤ تبعاً لمساحة سطح انتقال الحرارة A المستخدم بالمعادلة . فإذا كانت A_o هي المساحة الخارجية لسطح انتقال الحرارة (أي السطح الملامس للمبرد إذا كان سريان الماء داخل أنابيب المكثف وسريان المبرد خارج الأنابيب كما هو الحال عادة) فإن قيمة U تحسب مسندة إلى هذه المساحة كما يلي

$$\frac{1}{U_o} = \frac{A_o}{A_i}\frac{1}{h_w} + \frac{A_o}{A_i} r_{fw} + \left(\frac{t}{k}\right)\left(\frac{A_o}{A_m}\right) + \frac{1}{h_r} \tag{4.6}$$

حيث تعني التذييلات i و o و m المساحة الداخلية ، والمساحة الخارجية والمساحة المتوسطة ، على التوالي ، لسطح انتقال الحرارة . وتمثل h_w في المعادلة السابقة معامل انتقال الحرارة بين الماء وسطح الأنابيب ، وتمثل h_r معامل انتقال الحرارة بين المبرد وسطح الأنابيب ، بينما تمثل r_{fw} مقاومة الاتساخ لسطح الأنابيب من جهة الماء نتيجة لترسيب الأملاح والمواد الصلبة العالقة بالماء ، وتمثل t سمك جدار الأنابيب المستخدمة بالمكثف ، وتمثل k معامل الموصيلية الحرارية لمادة الأنابيب .

ولتحسين قيم U_o في المعادلة السابقة يعمل المصممون على الآتي . أولاً تحسين معامل انتقال الحرارة h_w للماء وذلك بزيادة سرعته كما بينا سابقاً وبجعل سريان الماء مضطرباً . أيضاً يعمل المصممون على تحسين قيمة h_r للمبردات المختلفة بجعل السريان مضطرباً ، وبعدم السماح ما أمكن بزيادة سمك طبقة السائل المتكثف الملاصق لسطح الأنابيب والعمل على سقوط هذه الطبقة بأسرع ما يمكن إلى قاع المكثف (لتصغير المقاومة الحرارية لطبقة السائل المتكثف) . ولقد وُجِدَ أن قيمة h_r للأمونيا مقاربة لقيمة h_w ، إلا أنه وجد أيضاً صغر قيمة h_r لمبردات الهالوكربونات بالمقارنة بقيمة h_w ، مما يعمل على الحد من معدل انتقال الحرارة خلال سطح المكثف . وللتغلب على هذه المشكلة تستخدم عادة أسطح ممتدة (زعانف) على سطح الأنابيب من جهة المبرد مما يساعد على زيادة سطح انتقال الحرارة لتعويض صغر قيمة h_r . ولحساب قيم h_w و h_r عند ظروف تشغيل مختلفة يمكن الرجوع إلى مراجع انتقال الحرارة مثل [كريث وبلاك ١٩٨٠، وأوزيسك ١٩٨٥ ، وروزينو وهارتنت ١٩٧٣ ، وغيرها] .

ولتحسين قيمة U_o أيضاً ، تُخْتَار أنابيب المكثفات من مواد جيدة التوصيل الحراري ، فيُستَخْدم النحاس في نظم الهالوكربونات ، بينما يستخدم الصلب بدلاً من النحاس لأنابيب مكثفات الأمونيا التي تعمل على تآكل النحاس . ويحاول المصممون دائماً

اختيار سمك جدار الأنابيب أقل ما يمكن لتحسين قيمة U_o أيضاً كما هو مبين بمعادلة ٤.٦ . لذا تستخدم نظم الهالوكربونات أنابيب نحاس رقيقة سمك الجدار ، أما أنابيب نظم الأمونيا فيزيد سمك الجدار بها نسبياً نظراً للارتفاع النسبي لضغط الأمونيا بالمقارنة بضغط الهالوكربونات في المكثفات . كما يعمل المصممون على صفر قيمة مقاومة الاتساخ في المعادلة ٦ . ٤ لتحسين قيمة معامل انتقال الحرارة ، وسنتعرض لمزيد من التفصيل حول هذا الموضوع في الجزء التالي .

٤.٦.٣ المقاومة الحرارية لاتساخ سطح المكثف

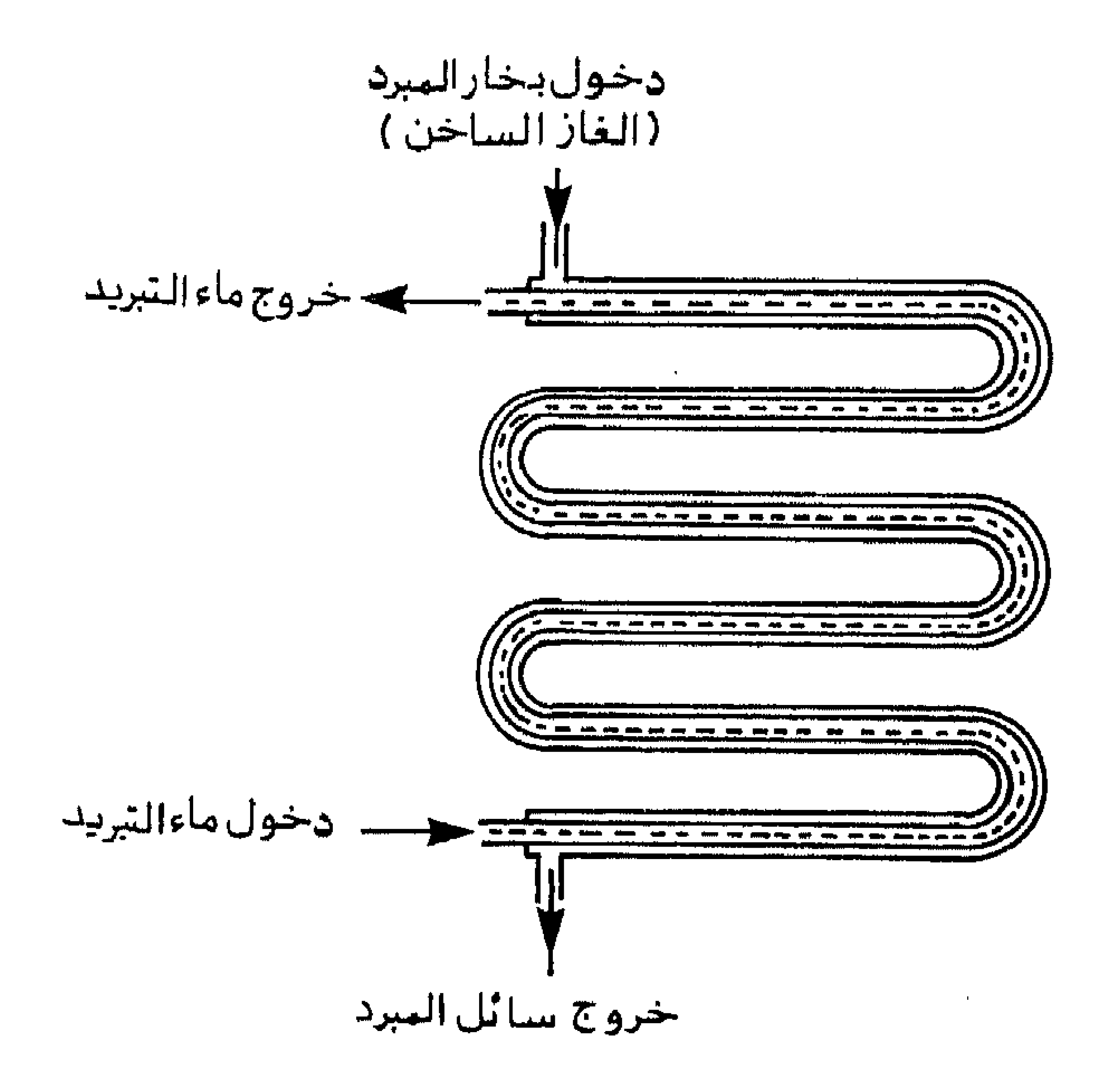
يسري ماء التبريد داخل أنابيب المكثف ويحمل هذا الماء ، تبعاً لدرجة نقاوته ونوعيته ، بعضاً من المواد الصلبة العالقة به بالإضافة إلى العديد من الأملاح المذابة به ، وبمرور الزمن تبدأ عملية الترسيب وتكوين القشور على سطح انتقال الحرارة ، وحتى في أنقى أنواع المياه تتم عملية تكوين القشور هذه ، ولكن بمعدلات بطيئة . وتعمل القشور المترسبة على تكوين طبقة عازلة حرارياً مما يؤدي إلى خفض معامل انتقال الحرارة وبالتالي انخفاض الحمل الحراري المطرود من المكثف . وتعتبر أملاح كربونات الكالسيوم هي أولى القشور المترسبة على أسطح المكثف حيث تكون درجة الحرارة بها مرتفعة نسبياً مما يساعد على ترسيب هذه القشور .

وينصح عادة باستخدام معالجة كيميائية مستمرة لماء التبريد ، وذلك باستخدام مضخة خاصة لحقن كيميائيات إلى هذا الماء . وتعمل هذه الكيميائيات على تأخير عملية الترسيب دون منعها كلية ، أو إلى جعل القشور المترسبة لينة يسهل إزالتها ، أو لكلا الغرضين . كما ينصح عادة للتقليل من تكوين القشور على سطح المكثف المحافظة على ماء التبريد قلوياً بدرجة بسيطة بأن يكون الأس الهيدروجيني له حوالي من ٧ إلى ٧.٥ . ويعطي مصنعو المكثفات أداء مكثفاتهم لأسطح انتقال حرارة نظيفة نسبياً ، مع قيمة سماح

صغيرة لمقاومة الاتساخ . لذا يلزم عند التشغيل ، التنظيف الدوري لسطح المكثف من جهة سريان الماء للمحافظة على كفاءة عملية انتقال الحرارة عند قيمة مرتفعة ، مما يحسن أداء مكنة التبريد . وتنظف أنابيب المكثف إما ميكانيكياً باستخدام فرش خاصة لهذا الغرض مصنعة من الصلب لمواسير الصلب ، ومن البلاستيك لمواسير النحاس ، وإما باستخدام كيمائيات تتفاعل مع القشور ثم يتم غسلها قبل التشغيل مرة أخرى .

٤.٦.٤ أنواع المكثفات المبردة بالماء

هناك أربعة أنواع من المكثفات المبردة بالماء هي : مكثف الأنبوب المزدوج ، ومكثف الغلاف والملف ، ومكثف الغلاف والأنبوب الأفقي ، ومكثف الغلاف والأنبوب الرأسي .



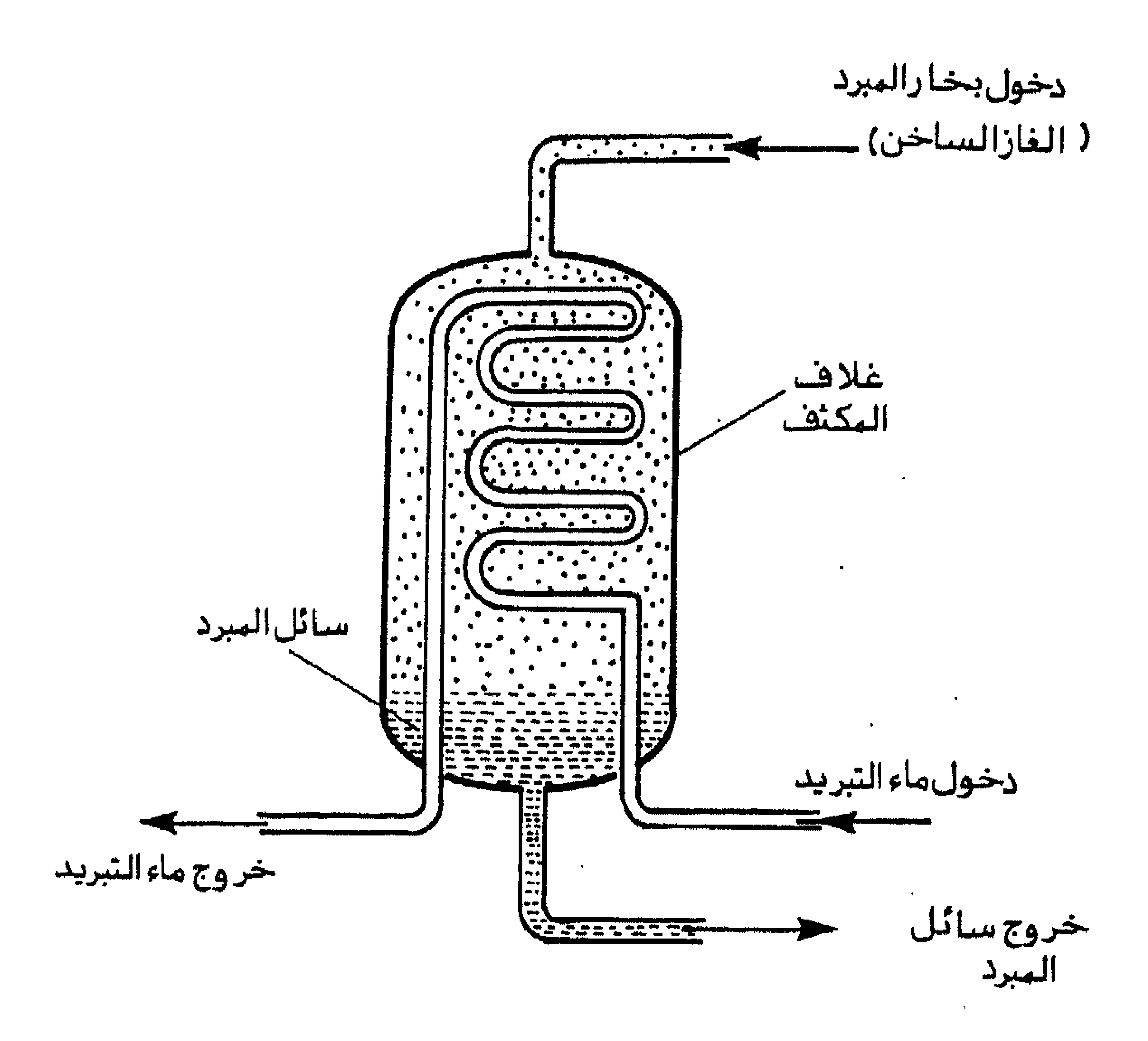
شكل ٤.١١ رسم تخطيطي لمكثف الأنبوب المزدوج .

أ) مكثف الأنبوب المزدوج

يتكون هذا النوع من المكثفات من أنبوبين أحدهما داخل الآخر كما هو مبين بشكل ٤.١١ . يسري ماء التبريد عادة خلال الأنبوب الداخلي ، ويسري بخار المبرد في الحيز الحلقي بين الأنبوبين حيث يتم تكثيفه قبل الخروج من المكثف . ويمتاز هذا النوع من المكثفات بسهولة تركيبه وانخفاض تكلفته . ويستخدم مكثف الأنبوب المزدوج في التطبيقات الصغيرة التي لا تزيد سعة تبريدها عادة عن حوالي ٨٠ كيلووات تبريد . أيضاً، يستخدم هذا النوع من المكثفات بنجاح كمكثف مساعد عند أحمال الذروة . ومن أهم عيوب هذا النوع من المكثفات صعوبة تنظيف الأنابيب ميكانيكياً وضرورة تنظيفها كيميائياً نظراً لعدم استقامة الأنابيب ، إلا أن هذا العيب يمكن التغلب عليه بتصنيع مكثفات مستقيمة الأنابيب .

ب) مكثف الغلاف والملف

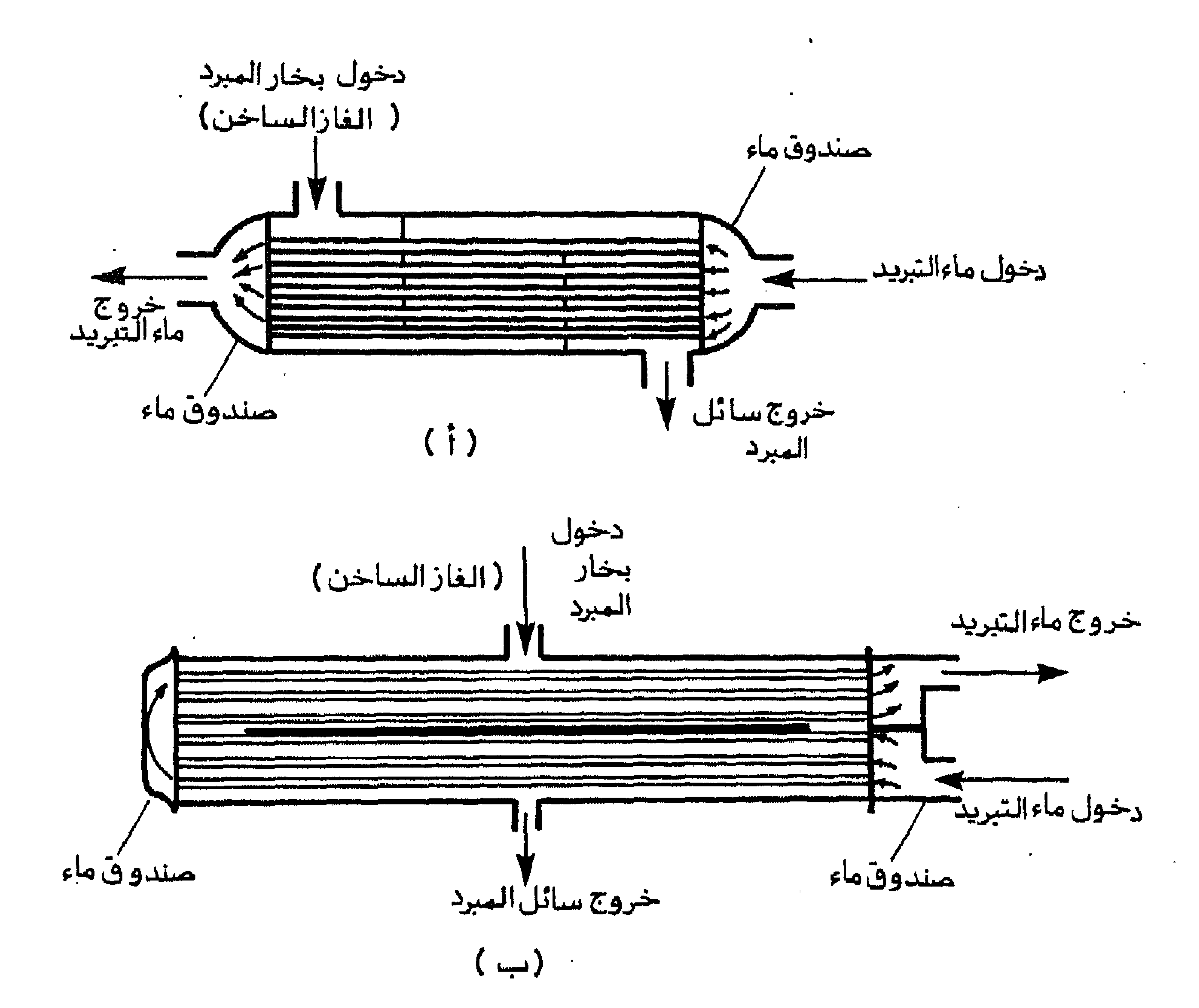
يتكون هذا المكثف كما هو مبين بشكل ٤.١٢ من غلاف أسطواني الشكل يحوي بداخله ملف لولبي . يدخل ماء التبريد إلى الملف اللولبي من أسفل الغلاف ويخرج ماء التبريد من الملف اللولبي من أسفل الغلاف أيضاً ، بينما يدخل بخار المبرد (الغاز الساخن) إلى الغلاف من أعلى ويخرج سائل المبرد من أسفل الغلاف ، وتساعد طريقة السريان هذه على تحسين عملية انتقال الحرارة بين الماء والمبرد ، ويستخدم هذا النوع من المكثفات في التطبيقات ذات سعة التبريد الصغيرة نسبياً ، وحتى ٥٠ كيلووات تبريد . ومن أهم مميزات هذه المكثفات سهولة تركيبها وانخفاض تكلفتها ، إلا أن أهم عيوبها صعوبة تنظيف السطح الداخلي للملف ميكانيكياً وضرورة تنظيفه كيمائياً .



شكل ١٢ . ٤ رسم تخطيطي لمكثف الغلاف والملف .

جـ) مكثف الغلاف والأنبوب الأفقي

يعتبر هذا النوع من المكثفات هو أكثر أنواع المكثفات انتشاراً . ويُسْتَخدم هذا المكثف في معظم تطبيقات التبريد لسعات تبريد من ١٢ كيلووات حتى أكثر من ٣٥٠٠٠ كيلووات تبريد . ويتكون المكثف من غلاف به عدة أنابيب يسري داخلها ماء التبريد . ويدخل بخار المبرد إلى الغلاف من أعلى حيث يتم التكثيف على السطح الخارجي للأنابيب ، ويتساقط الكثف إلى قاع الغلاف حيث يخرج سائل المبرد . ويصنف مكثف الغلاف والأنبوب تبعاً لعدد ممرات ماء التبريد بالمكثف ، فيقال أن المكثف أحادي الممر لماء التبريد إذا سمح للماء بالمرور مرة واحدة فقط خلال جسم المكثف كما هو موضح بالحالة أ بشكل ١٣ . ٤ ، أو ثنائي الممر للماء إذا سمح للماء بالمرور مرتين خلال جسم المكثف كما هو موضح



شكل ٤.١٣ رسم تخطيطي لمكثف غلاف وأنبوب : أ) أحادي الممر لماء التبريد ، ب) ثنائي الممر لماء التبريد.

بالحالة ب بشكل ٤.١٣ ، وهكذا . وتستخدم بعض التطبيقات الجزء السفلي من الغلاف كمستقبل لسائل المبرد ، مما ينفي الحاجة إلى مستقبل خارجي . ويمتاز هذا النوع من المكثفات بكفاءته لعملية انتقال الحرارة وتكثيف بخار المبرد ، كما يمتاز أيضاً بسهولة تنظيف أنابيبه ميكانيكياً بعد فك صندوقي الماء عند طرفي المكثف . ومن عيوب هذا المكثف ارتفاع تكلفته نسبياً بالمقارنة بأنواع المكثفات الأخرى .

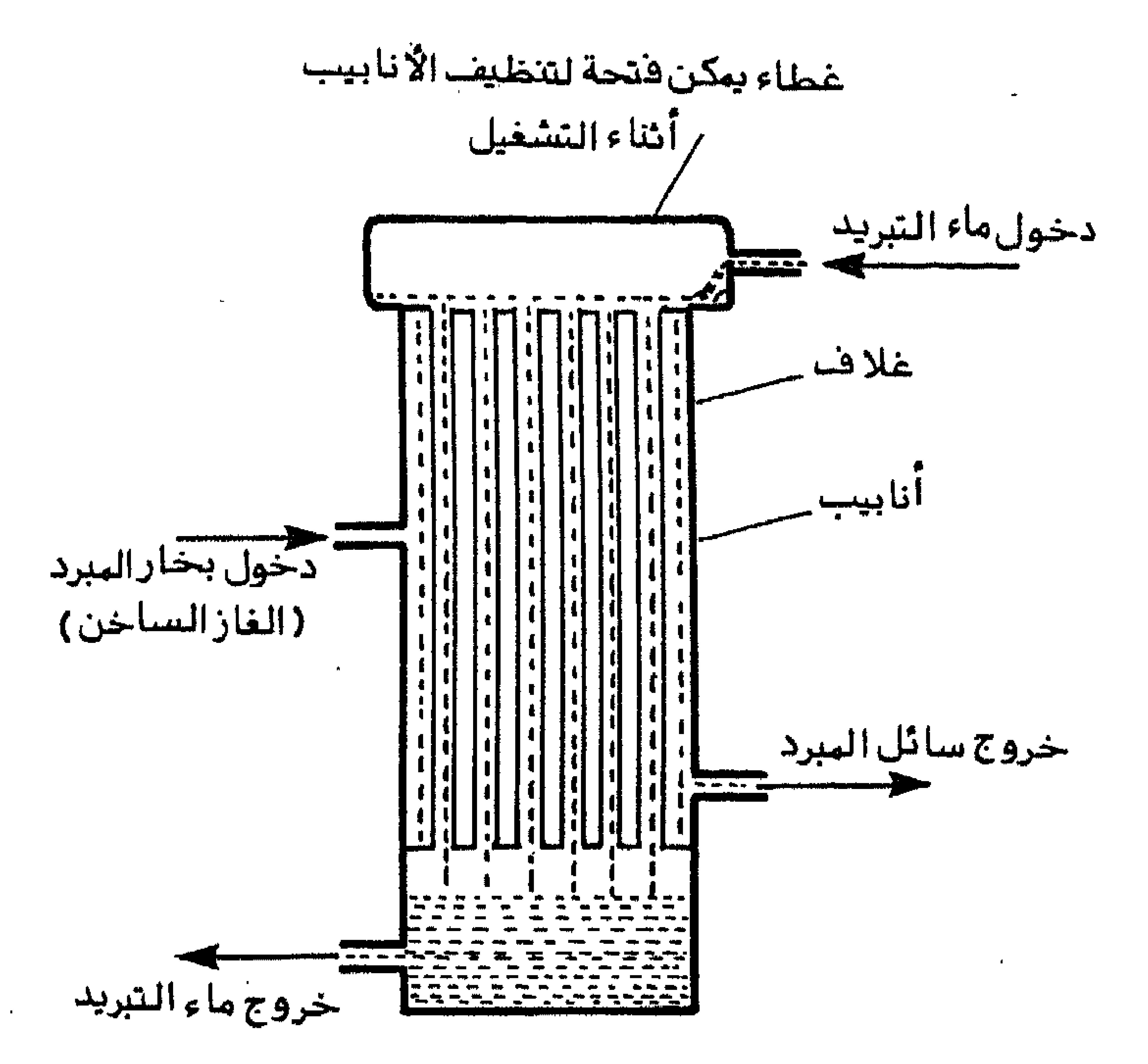
وتتوفر هذه المكثفات في صناعة التبريد بعدة مقاسات تبعاً للحمل الحراري المطلوب من المكثف . ويتراوح قطر الغلاف الأسطواني الشكل لهذه المكثفات بين ١٠ سم

إلى ١٥ متراً ، وتستخدم أنابيب نحاس بقطر خارجي قدره من ١٦ مم إلى ٥٠ مم عادة (نظم هالوكربونات) ، أو أنابيب صلب بقطر خارجي قدره ٣١.٧٥ مم عادة (نظم الأمونيا) . كما يتراوح طول أنابيب هذه المكثفات عادة بين متر إلى ٦.٥ متر ، وبعدد أنابيب يتراوح بين ٦ إلى أكثر من ١٠٠٠ أنبوب [أشراي ١٩٨٨] .

وتحوي بعض أنواع هذه المكثفات عدداً أضافياً من الأنابيب في الجزء السفلي من الغلاف للمساعدة على التبريد التحتي (التبريد الدوني) لسائل المبرد قبل الخروج من المكثف . ويعتمد عدد هذه الأنابيب على درجة التبريد التحتي المطلوبة بالمكثف ، ودرجة حرارة دخول ماء التبريد إلى المكثف ومعدل سريانه . أيضاً يحوي السطح الخارجي للأنابيب زعانف (أسطح ممتدة) لتحسين عملية انتقال الحرارة عند استخدام نظم الهالوكربونات ، ويلفت النظر إلى مراعاة ألا تزيد شحنة المبرد بهذا النوع من المكثفات التي تعمل أيضاً كمستقبل عن حد السماح ، حيث يعمل ارتفاع مستوي سائل المبرد بغلاف المكثف على إعاقة عملية انتقال الحرارة لتكثيف بخار المبرد ، مما يؤدي إلى ارتفاع الضغط بالمكثف.

د) مكثف الغلاف والأنبوب الرأسي

يستخدم هذا النوع من المكثفات عادة في نظم الأمونيا وهو مماثل لمكثف الغلاف والأنبوب الأفقي من حيث التصميم العام ، إلا أن المكثف الحالي يوضع دائماً في وضع رأسي . لذا يمتاز هذا المكثف بإشغاله لمساحة صغيرة من الأرضية . ويدخل ماء التبريد من أعلى المكثف ، كما هو مبين بشكل ٤.١٤ ، ثم يسقط بتأثير الجاذبية الأرضية داخل الأنابيب ، دون أن يغمر الماء الأنابيب كلية ، إلى قاع المكثف حيث يخرج مرة أخرى . يدخل بخار الأمونيا عند نقطة أعلى قليلاً من منتصف المكثف ، ويسقط سائل الأمونيا المتكثف إلى قاع الغلاف حيث فتحة الخروج من المكثف . ونظراً لسريان ماء التبريد فقط تحت



شكل ٤.١٤ رسم تخطيطي لمكثف غلاف وأنبوب رأسي .

تأثير الجاذبية الأرضية ودون وجود أي ضغط آخر خارجي فإنه يمكن إزالة غطاء صندوق الماء العلوي وتنظيف الأنابيب ميكانيكياً أثناء التشغيل ودون الحاجة لإيقاف التشغيل لهذا الغرض .

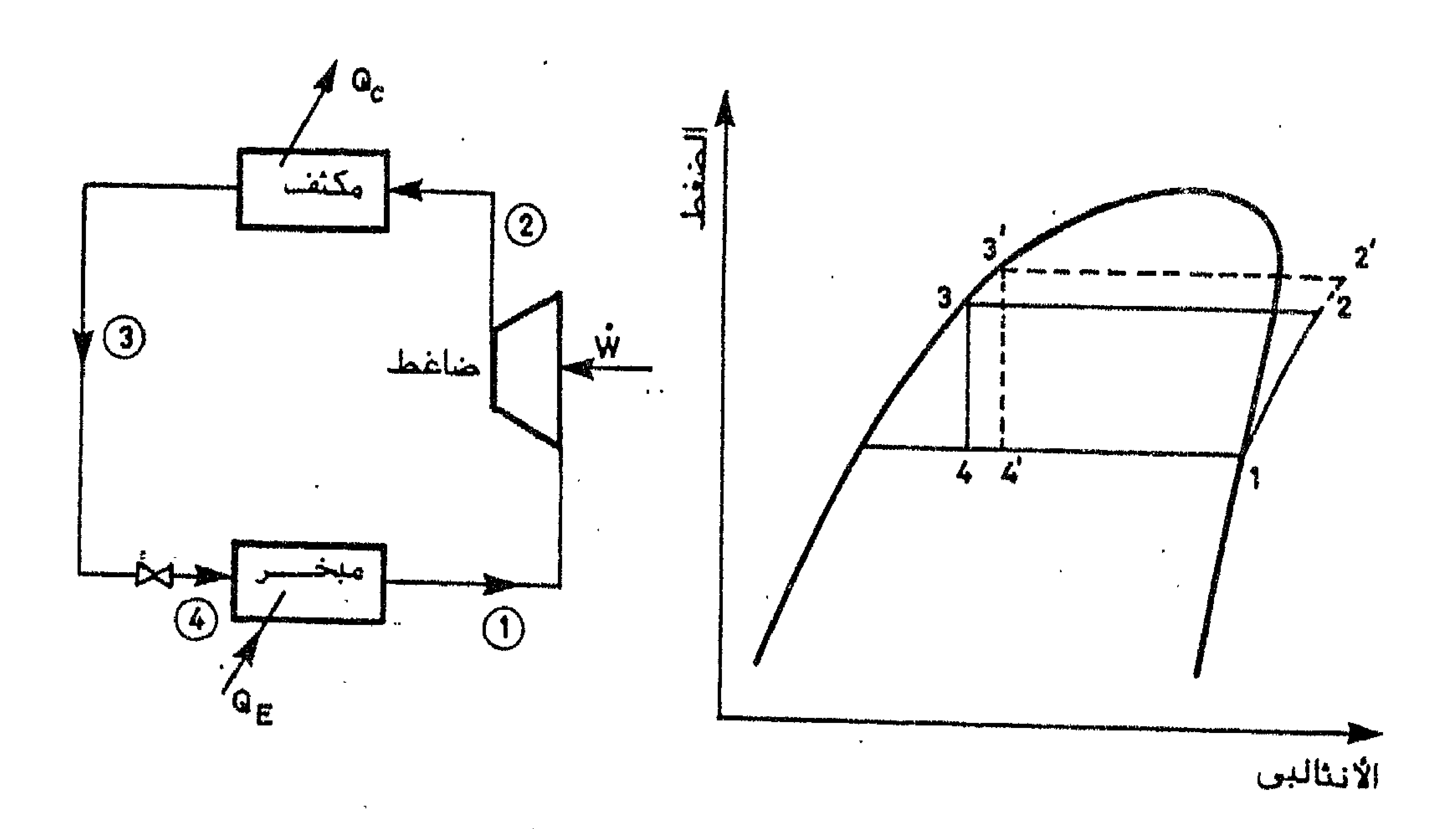
وتتوفر هذه المكثفات عادة بعدة أحجام ، فيتراوح قطر الغلاف بين ٤٠ سم إلى ١٥ متر وارتفاع المكثف بين ٣ إلى ٥ متر وعدد الأنابيب بين ٢٠ إلى ٤٠٠ أنبوب ، تبعاً لمقدار الحمل الحراري للمكثف [أشراي ، ١٩٨٨] .

٤.٦.٥ صيانة المكثفات المبردة بالماء

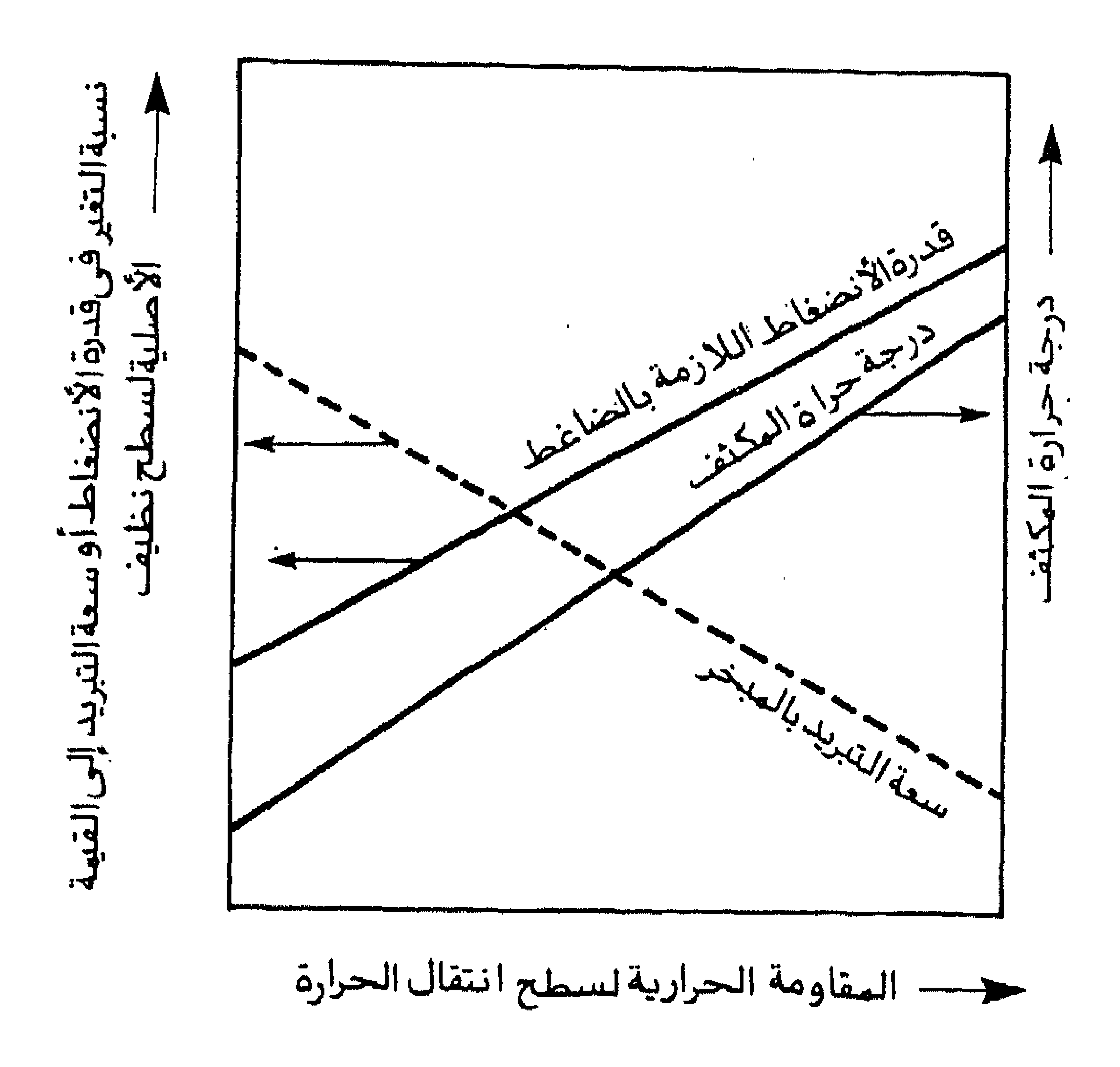
يعتمد أداء المكثف بدرجة كبيرة على نظافة سطح انتقال الحرارة من جهة الماء

فكما بينا سابقاً ، بمرور الوقت تتكون القشور على السطح الداخلي للأنابيب مما يزيد من المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة . ويؤدي زيادة هذه المقاومة الحرارية إلى انخفاض المعامل الكلي لانتقال الحرارة مما يعمل على رفع درجة حرارة المكثف ، وبالتالي يعمل على خفض سعة تبريد المبخر وزيادة قدرة الانضغاط كما هو موضح بشكل ٤.١٥ عند مقارنة أداء دورة تبريد بسيطة مع أداء نفس الدورة عند زيادة درجة حرارة المكثف . ويبن شكل ٤.١٦ الشكل العام لتغير درجة حرارة المكثف وسعة التبريد بالمبخر ، وكذلك قدرة الانضغاط اللازمة بالضاغط مع المقاومة الحرارية لسطح انتقال الحرارة من جهة الماء . ومن الشكل يتضح ضرورة التنظيف الدوري لأسطح انتقال الحرارة . وتعتمد فترة تشغيل المكثف بين مراحل الصيانة المختلفة على الموازنة بين تكلفة الصيانة وتكلفة تشغيل نظام التبريد عند زيادة المقاومة الحرارية .

وتنظف أسطح المكثف كما بينا سابقاً إما ميكانيكياً وإما كيميائياً . وقد يسبب



شكل ٤.١٥ تأثير ارتفاع درجة حرارة المكثف على أداء دورة تبريد بسيطة .



شكل ٤.١٦ تغير درجة حرارة المكثف وقدرة الانضغاط وسعة التبريد مع المقاومة الحرارية لسطح انتقال الحرارة من جهة الماء .

التآكل في بعض المكثفات على حدوث ثقوب في الأنبوب مما يؤدي إلى تسرب الماء والمبرد واختلاطهما معاً ، عندئذ يلزم صيانة المكثف إما باستبدال الأنابيب المتآكلة ، وإما سدها جيداً من الطرفين لمنع مرور الماء بها إذا كان عدد هذه الأنابيب يمثل نسبة ضئيلة من أنابيب المكثف . وتستعمل تركيزات مختلفة من محاليل بعض الأحماض ومواد كيمائية خاصة لتلين الرواسب والقشور الموجودة على الأسطح الداخلية أو الخارجية للأنابيب من جهة الماء ، ثم تستخدم فرش من النيلون أو السلك لتنظيف هذه الأسطح [بولس ١٩٨٧] .

٤.٧ المكثفات المبردة بالهواء

٤.٧.١ اساسيات

نظراً لتوفر الهواء مقارنة بالماء ، فإن المكثفات المبردة بالهواء تلاقي قبولاً كبيراً لمعظم التطبيقات المختلفة لهندسة التبريد . عندئذ يمرر المبرد داخل أنابيب المكثف بينما يمرر الهواء الجوي المحيط على السطح الخارجي لانتقال الحرارة بالمكثف . ويعتمد معدل انتقال الحرارة في هذه المكثفات ، تبعاً للمعادلة ٤.٢ على قيمة معامل انتقال الحرارة U ، بالإضافة إلى قيمة الفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد والهواء . ويحسب معامل انتقال الحرارة U في هذه المكثفات بمعادلة مماثلة للمعادلة ٤.٦ ، والتي تأخذ الصورة التالية

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_r} + \frac{t}{k}\left(\frac{A_i}{A_m}\right) + \frac{A_i}{A_o} r_a + \frac{A_i}{A_o}\frac{1}{h_a} \tag{4.7}$$

حيث U_i هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة مسنداً إلى السطح الداخلي لانتقال الحرارة ، و A هي مساحة انتقال الحرارة ، و h_a و h_r هما على التوالي معاملا انتقال الحرارة بالهواء والمبرد ، و r_a هي المقاومة الحرارية للاتساخ من جهة الهواء . وتعني التذيلات i و o و m المساحة الداخلية والخارجية والمتوسطة لسطح انتقال الحرارة ، على التوالي .

ونظراً لصغر قيمة معامل انتقال الحرارة h_a من جهة الهواء بالمقارنة بمعامل انتقال الحرارة h_r من جهة المبرد يفضل عادة استخدام أسطح ممتدة (زعانف) على سطح انتقال الحرارة من جهة الهواء (السطح الخارجي) لتحسين قيمة معامل انتقال الحرارة للمكثف .

وتصنع أنابيب المكثف لنظم الهالوكربونات عادة من أنابيب نحاس بقطر يتراوح بين ٦ إلى ٢٠ مم ، ويركب عليها أسطح ممتدة (زعانف) من رقائق النحاس أو الألومنيوم ، وإن كان الألومنيوم هو المستخدم في معظم الأحيان . وتُصنّع أنابيب مكثفات الأمونيا ، ونظم الهالوكربونات في بعض الأحيان ، من الصلب نظراً لتفاعل النحاس مع الأمونيا . عندئذ يجب معالجة الصلب لحمايته من العوامل الجوية خاصة إذا وضع المكثف في جو خارجي عالي الرطوبة . وتستخدم الأسطح الممتدة عادة بمسافات تتراوح بين ١,٤ إلى ٣,٢ مم بين هذه الأسطح وتزيد هذه المسافات في الأجواء المتربة وتقل كلما كان الهواء في منطقة عمل المكثف نظيفاً نسبياً .

يتحسن معامل انتقال الحرارة في المكثفات المبردة بالهواء بزيادة معدل سريان الهواء خلال هذه المكثفات مما يعني انخفاض درجة حرارة المكثف وبالتالي انخفاض قدرة الانضغاط بالضاغط ، هذا من ناحية ، إلا أنه من ناحية أخرى ، يزيد فقد الضغط لسريان الهواء خلال المكثف مما يزيد من استهلاك قدرة تشغيل مروحة دفع الهواء . ويلزم للمصمم عندئذ حساب أفضل معدل سريان للهواء للموازنة بين تحسين انتقال الحرارة وزيادة فقد الضغط . ويتراوح معدل سريان الهواء الأمثل خلال المكثفات بحوالي من ٨٠ إلى ١٦٠ لتر/ث لكل كيلووات من الحمل الحراري بالمكثف .

وبالرجوع إلى معادلة انتقال الحمل الحراري خلال سطح المكثف ، معادلة ٤,٢ ، نجد أن هذا الحمل يعتمد على الفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد والهواء . وبزيادة هذا الفرق ، ترتفع درجة حرارة المكثف مما يعني زيادة قدرة الانضغاط بالضاغط بالاضافة إلى انخفاض التأثير التبريدي بالمبخر كما وضحنا سابقاً في شكل ٤,١٥ . ويلزم لخفض قيمة هذا الفرق زيادة معدل سريان الهواء خلال المكثف . أو كبر مساحة سطح انتقال الحرارة بالمكثف ، أو كليهما . وهذا يعني زيادة تكاليف التشغيل أو زيادة التكلفة الأولية أو كليهما معاً . ولقد أظهرت التصميمات وخبرات تشغيل المكثفات المبردة بالهواء أن

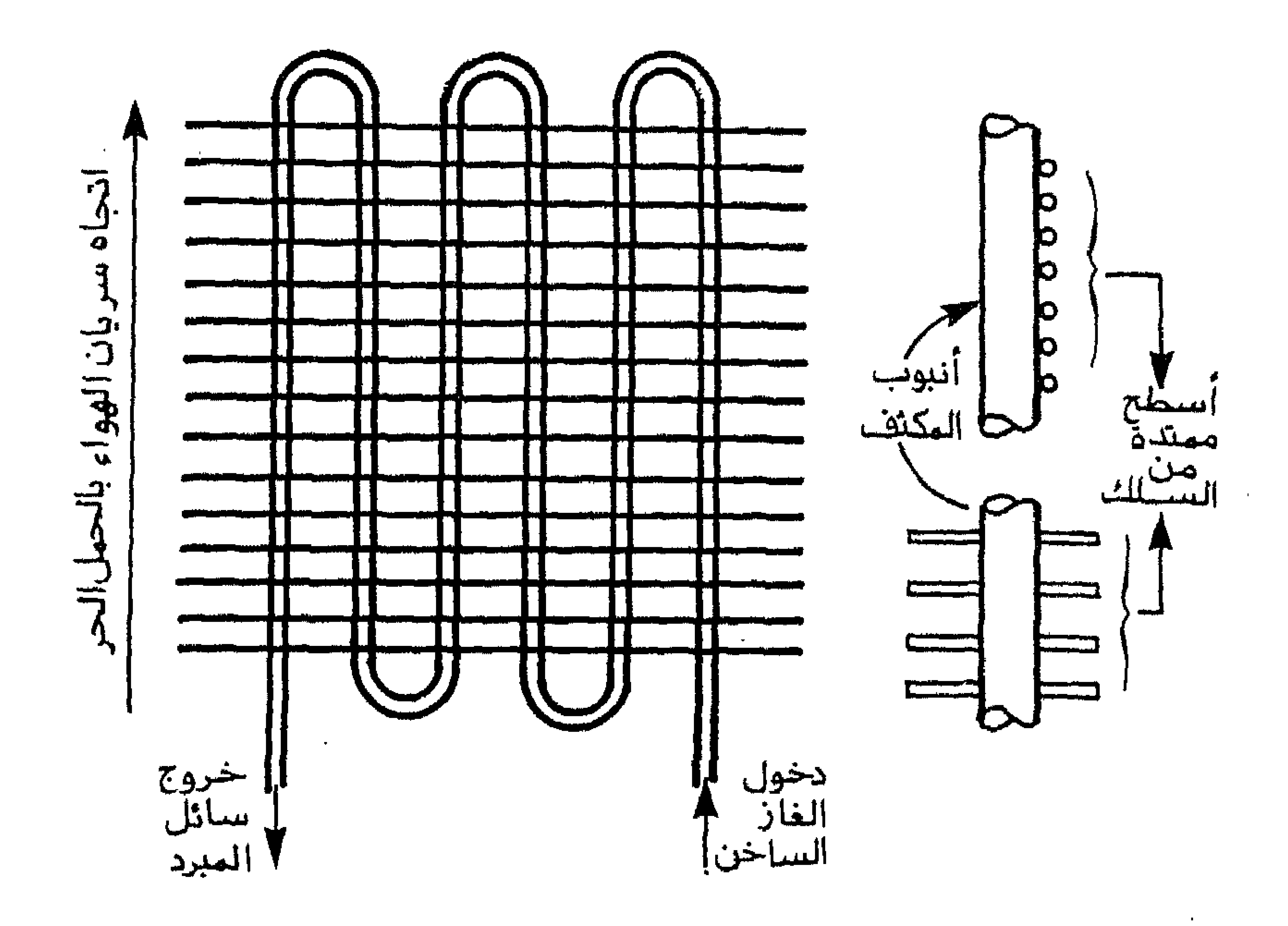
القيمة المثلى للفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد والهواء يجب أن تتراوح بين ٨ إلى ٢٢ ° م ، تبعاً لظروف التشغيل للمكثف [أشراي ١٩٨٨] .

٤.٧.٣ انواع المكثفات المبردة بالهواء

تنقسم المكثفات المبردة بالهواء إلى نوعين أساسين : المكثفات المبردة بالحمل الحر والمكثفات المبردة بالحمل القسري .

في النوع الأول – المكثفات المبردة بالحمل الحر – يسري الهواء فوق سطح المكثف نتيجة ارتفاع درجة حرارته بالقرب من سطح المكثف مما يقلل كثافته ، وبالتالي يتحرك إلى أعلى نتيجة ما يسمى بتيارات الحمل الحر . وتكون سرعة الهواء عندئذ منخفضة نسبياً ، مما يعني عدم قدرة هذا النوع من المكثفات على مناولة الأحمال الحرارية الكبيرة . ويستخدم هذا النوع في التطبيقات ذات الأحمال الحرارية الصغيرة مثل الثلاجات والمجمدات المنزلية . وتصنع الأسطح الممتدة لهذه المكثفات عادة من أسلاك مثبتة بلحام على أسطح الأنابيب ، مع ترك مسافات كبيرة نسبياً بين هذه الأسلاك وبعضها البعض لمنع انسداد هذه الفتحات بالأتربة والأوساخ مما يعوق سريان الهواء خلالها (أنظر شكل ٤.١٧) . أيضاً يجب عند استخدام هذ النوع من المكثفات ترك فراغ مناسب من الهواء الجوي حول هذه المكثفات لسهولة سريان الهواء فوق هذه المكثفات مع السماح بتجديد هذا الهواء باستمرار .

في النوع الثاني – المكثفات المبردة بالحمل القسري – تُستَخْدَم مروحة لدفع الهواء على سطح المكثف . وينقسم هذا النوع إلى قسمين : المكثفات البعيدة ، ووحدات التكثيف . ويقصد بالنوع الأول تلك المكثفات التي توضع في مكان بعيد عن الضاغط وينقل إليها الغاز الساخن من الضاغط لتكثيفه . ويقصد بالنوع الثاني تلك المكثفات التي



شكل ١٧ . ٤ رسم تخطيطي لمكثف مبرد بالهواء بالحمل الحر .

تثبت بالمصنع على قاعدة واحدة مع الضاغط ويُشْتَرى الضاغط ومعه المكثف كوحدة واحدة .

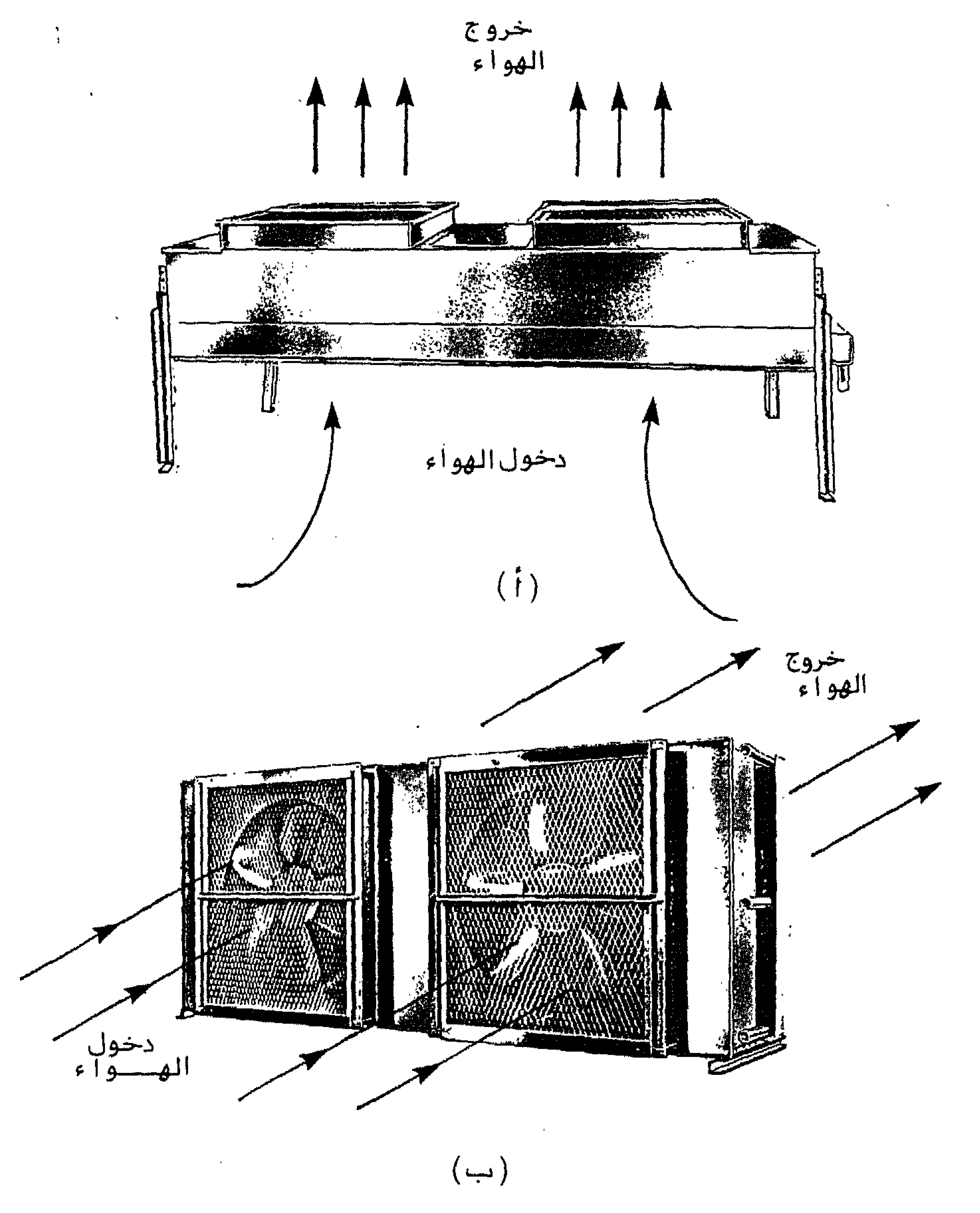
تستخدم المكثفات البعيدة مروحة خاصة بها ، ويُضْبَط معدل سريان الهواء الذي تدفعه هذه المروحة بالمصنع . وتستخدم عادة مراوح الدفع المحورية أو مراوح الطرد المركزي. وتعمل مراوح الدفع المحورية بكفاءة أفضل من تلك التي تعمل بها مراوح الطرد المركزي عندما يكون فقد الضغط لسريان الهواء صغيراً ، والعكس صحيح . وتحتاج هذه المراوح إلى موتورات لتشغيلها . وتتراوح قدرة هذه الموتورات عادة بين ٢٠ إلى ٤٢ وات لكل كيلووات حمل حراري بالمكثف ، تبعاً لنوع المروحة وظروف تشغيلها (أي معدل سريان الهواء ، ودرجة حرارته ، وفقد الضغط الذي تعمل به المروحة) ، [آشراي ١٩٨٨] . وتتوفر المكثفات البعيدة لمدى كبير من الأحمال بدءاً من ٢٠ كيلووات وحتى أحمال تزيد عن ٢٠٠٠ كيلووات .

تعمل مراوح مكثفات وحدات التكثيف بموتورات خاصة بها أو بموتور الضاغط مباشرة عند تركيبها على نفس محور دوران الموتور أو خلال طارة وسير ، تبعاً لنوع التصميم ، وتحتاج الطريقة الثانية (استخدام طارة وسير) إلى صيانة بالمقارنة إلى الطريقة الأولى التي لاتحتاج عادة إلا إلى قدر ضئيل من الصيانة ، وتتوفر هذه الوحدات لمدى كبير من الأحمال الحرارية ، وتمتاز بعدم الحاجة إلى اتزان الضاغط مع المكثف بالموقع عند التشغيل للوصول إلى نقطة اتزان التشغيل ، حيث يقوم المصنع بضبطهما معاً قبل البيع للمستهلك ، مما يعني التشغيل بكفاءة عالية .

تثبت مكثفات تبريد الهواء بالحمل القسري عادة فوق الأسطح أو في منطقة خارجية مسورة ، وإن كان يفضل وضعها فوق الأسطح في الأجواء المتربة حتى تكون بعيدة نسبياً عن سطح الأرض ، فتنخفض نسبة الأتربة بالجو المحيط بالمكثف . وتحفظ بعض هذه المكثفات – الصغيرة نسبياً – في غرف الآلات بالمباني ولكن يشترط تجديد هواء الغرف باستمرار ، ولا ينصح بذلك إلا للمكثفات الصغيرة فقط . ويسري الهواء الخارجي بهذه المكثفات بواحد من نظامين : نظام أفقي أو نظام رأسي كما هو موضح بشكل ٤.١٨ . في النظام الأفقي ، يسري الهواء أفقياً على أسطح انتقال الحرارة بالمكثف ويتأثر نوع المكثفات الذي يعمل بهذه الطريقة باتجاه وشدة الريح ، لذا ينصح بوضع عاكس ريح عند خروج الهواء من المكثف في المناطق شديدة سرعة الريح والمتغيرة الاتجاه . ويسري الهواء رأسياً، في النظام الرأسي ، خلال المكثف ، ولا يعتمد هذا النظام كثيراً على سرعة واتجاه الريح . ويوجد حالياً نظام ثالث من المكثفات يسحب فيه الهواء أفقياً ويخرج رأسياً من أعلى المكثف .

٤.٧.٣ صيانة المكثفات المبردة بالهواء

تقل الصيانة الدورية للمكثفات المبردة بالهواء بشكل ملحوظ عن الصيانة الدورية لمكثفات الماء ، وتقدر تكاليف هذه الصيانة عادة بحوالي ٢٥٪ من تكاليف صيانة مكثف



شكل ٤.١٨ رسم تخطيطي مجسم لمكثف مبرد بالهواء بالحمل القسري : أ) سريان هواء رأسي ، ب) سريان هواء أفقي.

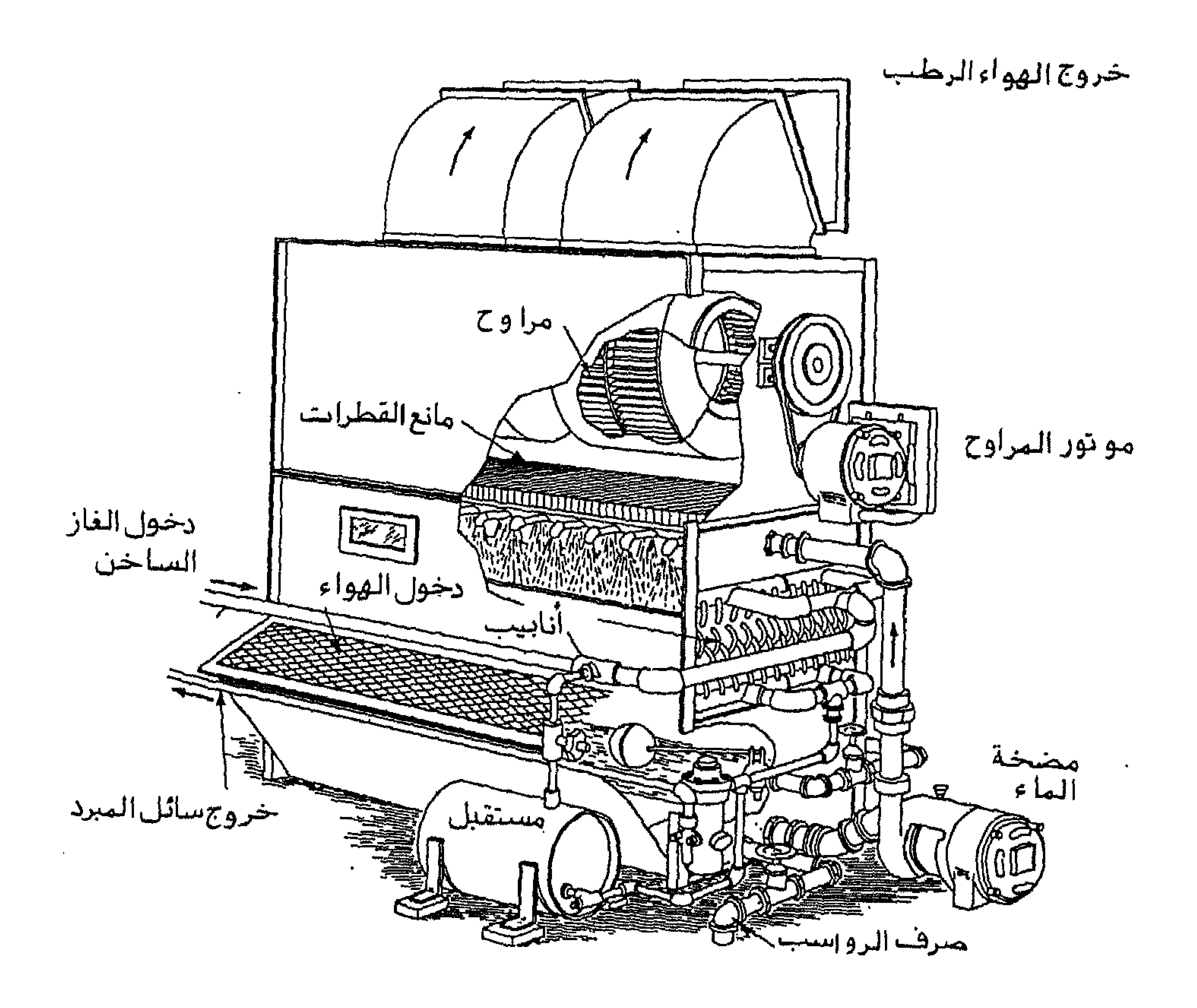
مماثل يبرد بالماء [الأشراي ١٩٨٣] . وتتطلب الصيانة الدورية للمكثفات المبردة بالهواء ثلاث مهام هي تزييت محامل وموتور المروحة ، وشد سير المروحة (عند استخدام سير

لنقل الحركة بين الموتور والمروحة) ، وتنظيف سطح انتقال الحرارة بالمكثف من جهة الهواء. ويعتمد هذا التنظيف على نوعية الجو الموجود به المكثف . ففي بعض المناطق يكفي استخدام الهواء المضغوط لإزالة الأتربة العالقة على السطح ، بينما يلزم في مناطق أخرى غسل سطح المكثف بالماء أو بعض المنظفات الخاصة بالإضافة لاستخدام فرشة لتنظيف السطح . وقد يتطلب الأمر في الأجواء المتربة استخدام مرشح (فلتر) خاص قابل للغسل للحد من ترسيب الأتربة على سطح انتقال الحرارة بالمكثف . أما الأماكن التي تكثر بها الأبخرة المحملة بمواد دهنية فيلزم استخدام محاليل كيميائية خاصة لإذابة هذه المواد الدهنية ، دون أن تؤثر هذه المحاليل على سطح انتقال الحرارة بالمكثف .

٤.٨ المكثفات التبخيرية

٤.٨.١ وصف المكثف

يتكون المكثف التبخيري من عدة أنابيب أفقية يسري بداخلها بخار المبرد ، ويسقط على سطح الأنابيب الخارجي ماء من أعلى بينما يسري هواء في اتجاه معاكس للماء، أي من أسفل إلى أعلى . ويعمل الماء على بلل سطح الأنابيب من الخارج ، وبمرور الهواء على الأسطح المبللة يتبخر الماء مما يعمل على ترطيب الهواء . وينتج عن عملية التبخير سحب الحرارة اللازمة لتبخير الماء من أسطح الأنابيب مسبباً تكثيف بخار المبرد بداخلها . ويسري الهواء الرطب إلى خارج المكثف من الجزء الأعلى به . ويبين شكل ٤.١٩ رسماً مجسماً لأحد المكثفات التبخيرية . ويتكون المكثف من جسم المكثف ، ومجموعة أنابيب أفقية ، ومضخة لتدوير ماء التبريد ، ومجموعة رشاشات للماء أعلى المكثف ، وحوض في أسفل المكثف لتجميع الماء المتساقط الذي لم يتبخر، ومروحة لسحب الهواء خلال المكثف ، وعوامة دخول ماء التعويض للمكثف .



شكل ٤.١٩ رسم تخطيطي مجسم لمكثف تبخيري.

وتستخدم المكثفات التبخيرية عادة مراوح طرد مركزي نظراً لكبر فقد الضغط خلال المكثف مما يجعل استخدام المراوح المحورية عندئذ غير اقتصادي . وتُركّب المروحة إما عند دخول المكثف وتعرف عندئذ بمروحة دفع خلال المكثف ، أو عند الخروج من المكثف وتعرف بمروحة سحب من المكثف . وفي الحالة الأخيرة يلزم أن تصنع المروحة وأرياشها من مواد مقاومة للتآكل نظراً لرطوبة الهواء عند الخروج من المكثف . وفي عدة تصميمات يستخدم موتوراً واحداً لتشغيل المروحة ومضخة المياه بالمكثف .

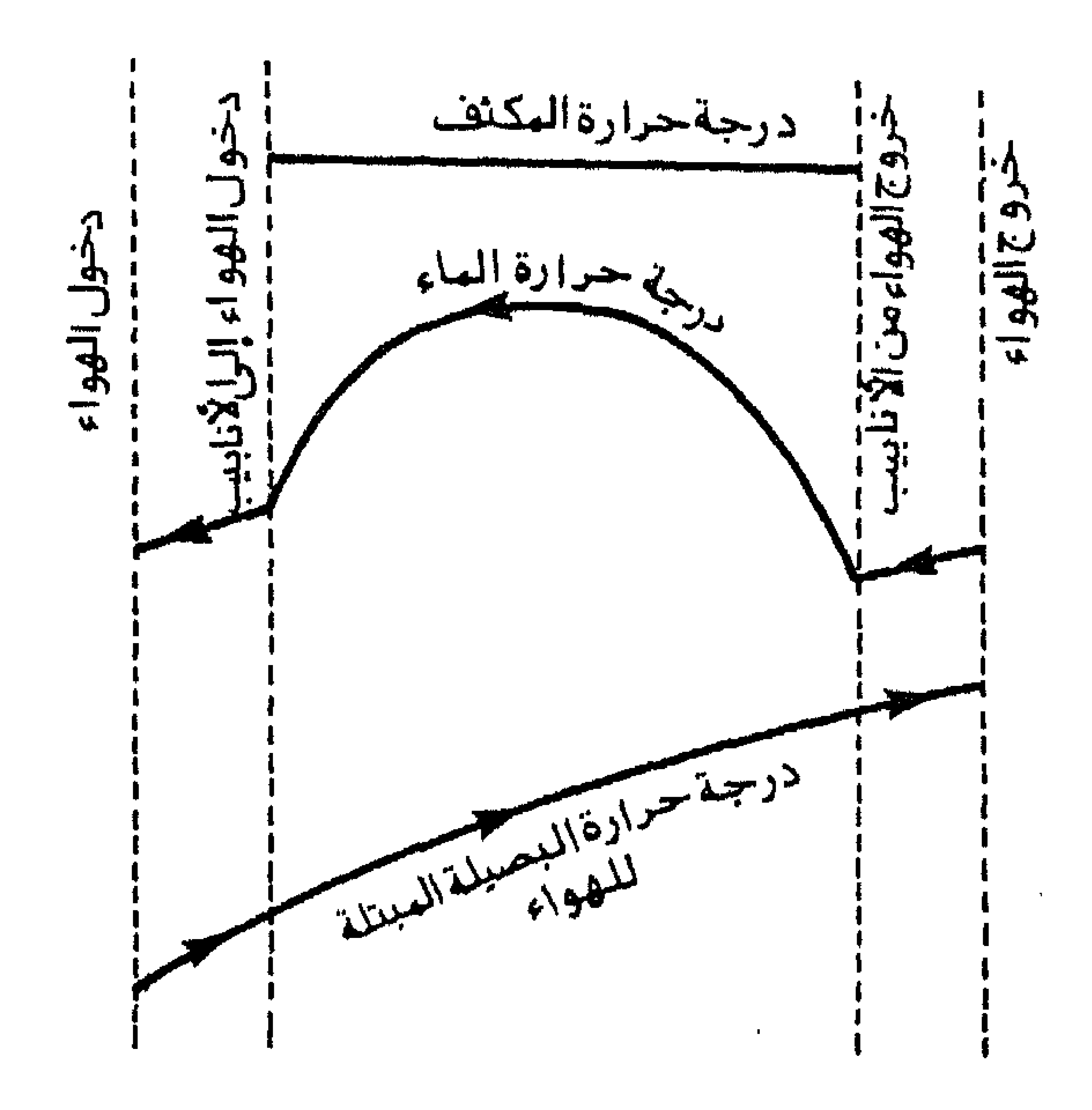
ويُضع المكثف التبخيري إما في الخارج أو في الداخل ، وفي حالة وضعه بالداخل

يلزم توصيله بالخارج بممرات لحمل الهواء الرطب الخارج من المكثف إلى الجو الخارجي . ويعتمد أداء المكثف التبخيري إلى حد كبير على درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء الداخل إليه ، كما سنبين فيما بعد ، فيتحسن أداء المكثف ، أي تنخفض درجة حرارة المكثف، بانخفاض هذه الدرجة . لذا يتغير الأداء خلال اليوم بتغير هذه الدرجة ، وبالتالي لا يصلح هذا النوع من المكثفات في الأجواء الرطبة ، وإن كان بالطبع يُفَضَّل في الأجواء الجافة حيث يكون أداؤه أفضل ما يمكن ، ويجب عندئذ توفر الماء اللازم لتشغيله . وفي حالة استخدام هذا النوع من المكثفات في نظم تكييف الهواء ، ينصح دائماً بتمرير الهواء المطرود من المكان المكيف في المكثف التبخيري لتحسين أداء المكثف حيث يكون هذا الهواء المطرود جافاً نسبياً . ويتم هذا بتصميم ممرات هواء للقيام بهذا الغرض .

يستخدم المكثف التبخيري سطح انتقال حرارة أصغر من ذلك المستخدم في المكثفات المبردة بالهواء . أيضاً ، نظراً لسقوط الماء على سطح أنابيب المبرد بالجاذبية الأرضية ، فإن فقد ضغط سريان الماء خلال هذه المكثفات أقل بكثير من الفقد في المكثفات المبردة بالماء مما يعني صغر القدرة اللازمة لضخ المياه في المكثفات التبخيرية بالمقارنة بقدرة ضخ المياه في المكثفات المبردة بالماء والمستخدمة لأبراج تبريد .

٤.٨.٣ انتقال الحرارة في المكثفات التبخيرية

تنتقل الحرارة من المبرد داخل الأنابيب إلى الخارج بثلاثة أشكال : أولاً كحرارة تبخير لجزء من الماء ، وكحرارة محسوسة تعمل على رفع درجة حرارة الماء غير المتبخر الساقط إلى حوض المكثف ، وكحرارة محسوسة تعمل على رفع درجة حرارة الهواء الساري بالمكثف . وتُكَوِّن حرارة التبخير الجزء الأساسي لعملية انتقال الحرارة ، بينما يهمل عادة الجزء المنتقل كحرارة محسوسة إلى الماء والهواء .



شكل ٤.٢. تغير درجة حرارة الماء ودرجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء خلال مكثف تبخيري.

يبين شكل ٤.٢. تغير درجة حرارة الماء ودرجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء خلال سطح المكثف. بمرور الهواء في سريان معاكس للماء، تزيد درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء نتيجة ترطيبه حتى يصل إلى أقصى رطوبة له عند الخروج من المكثف. وتعتمد قيمة نسبة الرطوبة للهواء الخارج من المكثف على عدة عوامل منها سرعة الهواء خلال المكثف، ونسبة الرطوبة عند الدخول للمكثف، ودرجة حرارة البصيلة المبتلة له عند الدخول، ودرجة حرارة وسرعة الماء الساري بالمكثف، بالإضافة إلى مساحتي انتقال الحرارة وانتقال الكتلة في المكثف (وكلتا المساحتين يعتمد على تصميم المكثف). بترطيب الهواء ترتفع درجة حرارة البصيلة المبتلة له. وبسريان الماء من أعلى إلى أسفل خلال المكثف تتغير درجة حرارة الماء. في الجزء العلوي وقبل وصول الماء إلى سطح الأنابيب، تنخفض درجة حرارة الماء نتيجة ترطيب الهواء، وعندما يصل الماء إلى السطح الخارجي للأنابيب تنتقل الحرارة من المبرد داخل الأنابيب إلى الماء وفي نفس الوقت يبرد الماء نتيجة البخر إلى الهواء. في الجزء العلوي من الأنابيب يزيد معدل تسخين الماء عن معدل

تبريده فترتفع درجة حرارة الماء ، وفي الجزء السفلي من الأنابيب يقل معدل التسخين عن معدل التبريد فتنخفض درجة حرارة الماء ، كما هو مبين بشكل ٤.٢٠ . بعد خروج الماء من الأنابيب ، يبرد الماء نتيجة ملامسته للهواء الجاف الداخل إلى المكثف .

تعتمد درجة حرارة المكثف على درجة حرارة دخول الماء والهواء إلى المكثف ومعدل سريان كل منهما والرطوبة النسبية للهواء عند الدخول إلى المكثف ، هذا بالإضافة إلى مساحة سطح انتقال الحرارة وسطح انتقال الكتلة بالمكثف . وبزيادة معدل سريان الهواء خلال المكثف تتحسن عملية انتقال الحرارة وبالتالي تنخفض درجة حرارة المكثف مما يعني انخفاض ضغط المكثف وبالتالي انخفاض قدرة الانضغاط وتخفيض تكاليف تشغيل دورة التبريد لكل كيلووات من سعة التبريد ، إلا أن زيادة معدل سريان الهواء يزيد من قدرة تشغيل المروحة وبالتالي زيادة التكاليف مرة أخرى ، لذا يحتاج تصميم المكثف التبخيري إلى حساب المعدل الأمثل لسريان الهواء . أيضاً يتحسن انتقال الحرارة في المكثف بزيادة معدل سريان الماء خلال المكثف لنفس الأسباب السابقة ، ويلزم أيضاً حساب معدل سريان الماء الأمثل إلى المكثف . ويتراوح معدل سريان الهواء خلال المكثف التبخيري عادة بين ٠.٠٠٢ إلى ٠.٠٠٥ م^3/ث لكل كيلووات من سعة التبريد ، بينما يتراوح معدل سريان الماء خلال المكثف التبخيري بين ٠.٠٠٢ إلى ٠.٠٠٤ لتر/ث لكل كيلووات من سعة التبريد .

وتصنع أنابيب المكثف التبخيري عادة من النحاس في نظم الهالوكربونات ومن الصلب في نظم الأمونيا ، ونظراً لارتفاع معامل انتقال الحرارة بين الأنابيب والماء والهواء خارجها فإنه لا تستخدم زعانف (أسطح ممتدة) على هذه الأنابيب مما يساعد أيضاً على سهولة تنظيف أسطحها الخارجية دورياً .

٣.٨.٤ معدل استهلاك الماء في المكثف التبخيري والحمل الحراري للمكثف

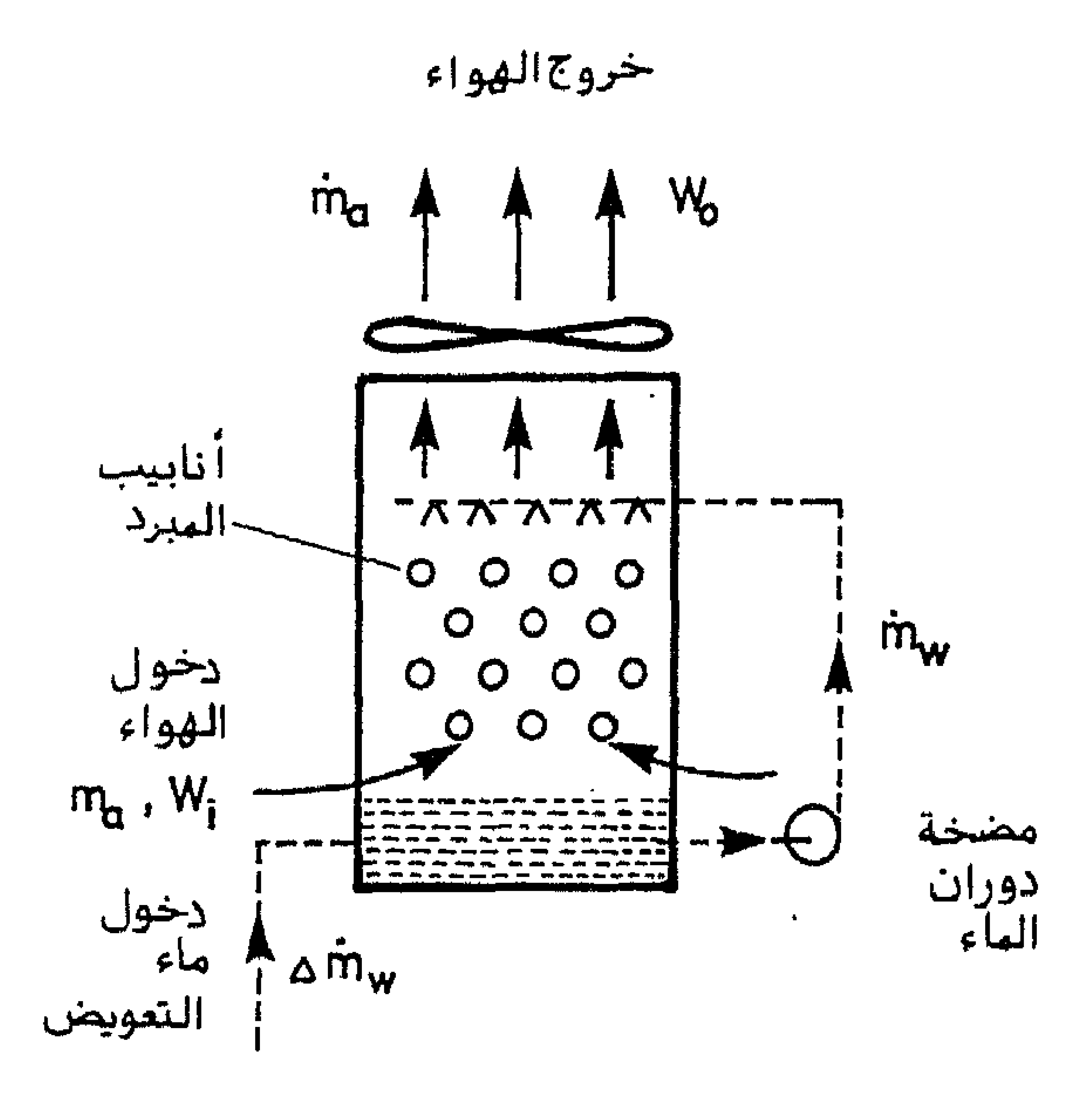
يفقد الماء في المكثف التبخيري في ثلاث عمليات :

أ) عملية التبخير ، وهي العملية الأساسية لتبريد المكثف ، ويعتمد معدل البخر أساساً على درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء الداخل إلى المكثف بالإضافة إلى عدة عوامل أخرى . ويقدر متوسط فقد الماء في هذه العملية بحوالي من ٠.٠٤ إلى ٠.٠٦ مليلتر/ث لكل كيلووات تبريد في المبخر (أي حوالي ١٪ تقريباً من سريان الماء) .

ب) قطرات الماء المحمولة بالهواء ، ويزيد هذا الفقد بزيادة سرعة الهواء الساري خلال المكثف . ويمكن أن يقل هذا الفقد بوضع مانع قطرات عند خروج الهواء من المكثف. ومانع القطرات هو عبارة عن حواجز مائلة من أسطح مستوية توضع عند خروج الهواء من المكثف ، وبارتطام الهواء بها تسقط قطرات الماء المحمولة بالهواء ، تحت تاثير تغير اتجاه حركتها وثقلها النسبي ، إلى داخل المكثف مرة أخرى . ويمكن في التصميمات الجيدة أن يصل فقد الماء بالقطرات المحمولة إلى حوالي من ٠.٠٠٢٪ إلى ٠.٠٠٢٪ فقط من معدل سريان الماء خلال المكثف [أشراي ، ١٩٨٨] .

جـ) عملية الصرف الدوري لجزء من الماء ، فمن المعروف زيادة ملوحة الماء الموجود بالمكثف باستمرار عملية البخر التي يفقد فيها ماء نقي دون فقد الأملاح الذائبة به . وللمحافظة على ملوحة ماء المكثف في مدى مناسب لتشغيل المكثف دون زيادة ترسيب القشور به وحمايته من التآكل ، يلزم دورياً صرف قدر ما من ماء المكثف واستبداله بماء جديد . ويؤخذ عادة معدل الصرف بحوالي ٥٠٪ من قيمة معدل الفقد بالبخر في المكثف .

ويلزم تعويض الفقد في ماء المكثف لحماية مضخة تدوير الماء من التشغيل الجاف ، ولضمان وجود ماء كاف لعملية تبريد المكثف . ويتم هذا التعويض أتوماتيا باستخدام



شكل ٤.٢١ رسم تخطيطي لسريان الماء والهواء خلال مكثف تبخيري .

محبس عوامة متصل بمصدر خارجي لإمداد الماء . ويجب مراعاة معالجة ماء المكثف بإحدى الطرق المعروفة للتقليل من ترسيب القشور بالمكثف ولتأخير عملية التآكل ما أمكن .

ولحساب معدل فقد الماء بالبخر ، يمكننا أخذ اتزان كتلة الماء للمكثف التبخيري الموضح بشكل ٤.٢١ . فإذا كانت m_a هي معدل سريان الهواء خلال المكثف و كانت W_i و W_o هي على التوالي نسبة الرطوبة بالهواء عند الدخول والخروج إلى ومن المكثف ، فإن معدل فقد الماء بالتبخير يعطى كما يلي

$$\Delta m_{we} = m_a (W_o - W_i) \tag{4.8}$$

وبفرض تصميم جيد لمانع القطرات ، يمكن إهمال الفقد الناتج عن حمل الهواء الخارج لقطرات الماء ، وبفرض معدل صرف قدره ٥٠٪ من معدل الفقد بالبخر ، يعطى إجمالي معدل الفقد في الماء عندئذ كما يلي

$$\Delta \dot{m}_w = 1.5 \dot{m}_a (W_o - W_i) \tag{4.9}$$

ويقدر معدل الحرارة المطرودة من المكثف (أي الحمل الحراري للمكثف) Q_c بأخذ اتزان حراري للمكثف الموضح بشكل ٤.٢١ ، ومنها ينتج أن

$$Q_c = \dot{m}_a (h_{ao} - h_{ai}) - \Delta \dot{m}_w h_w \tag{4.10}$$

حيث h_{ai} و h_{ao} هي إنثالبي الهواء الداخل والخارج إلى ومن المكثف على التوالي و h_w هي إنثالبي ماء التعويض الداخل إلى المكثف .

مثال ٤.٢

مكثف تبخيري يسري به هواء بمعدل قدره ٤ م^3/ث عند درجتي حرارة دخول قدرهما ٣٠ ^{o}م بصيلة جافة و ٢٢ ^{o}م بصيلة مبتلة ، ودرجتي حرارة خروج قدرهما ٣٦ ^{o}م بصيلة جافة و ٣٠ ^{o}م بصيلة مبتلة . بفرض أن ماء التعويض يدخل إلى المكثف عند ٢٥ ^{o}م احسب الحمل الحراري للمكثف .

الحل

من خريطة السيكرومتري للهواء نجد الآتي باستخدام المعطيات عاليه :

نسبة الرطوبة عند دخول الهواء إلى المكثف = ٠.٠١٣٥ كجم ماء/كجم هواء جاف

نسبة الرطوبة عند خروج الهواء من المكثف = ٠.٠٢٥ كجم ماء/كجم هواء جاف

إنثالبي الهواءعند الدخول إلى المكثف = ٦٥ كيلوجول/كجم هواء جاف

إنثالبي الهواءعند الخروج من المكثف = ١٠٠ كيلوجول/كجم هواء جاف

الحجم النوعي للهواء عند دخول المكثف = ٠.٨٧٧ م^3 /كجم هواء جاف

ومن جداول البخار نجد أن إنثالبي ماء التعويض عند الدخول للمكثف = ١٠٤.٨ كيلوجول/كجم .

عندئذ من معادلة ٩ . ٤ نجد أن

$$\Delta \dot{m}_w = 1.5 \times \frac{4}{0.877} \times (0.025 - 0.0135) = 0.0787 \quad kg/s$$

ومن معادلة ١٠ . ٤ نجد الحمل الحراري للمكثف كما يلي

$$\dot{Q}_c = \frac{4}{0.877} (100 - 65) - 0.0787 \times 104.8 = 151 \quad kW$$

٤ . ٨ . ٤ صيانة المكثفات التبخيرية

يلزم وجود صيانة دورية للمكثفات التبخيرية لضمان أن يكون أداؤها جيداً . وتشمل الصيانة الدورية لهذه المكثفات تزييت الحامل لمروحة الهواء ، وشد أو تغيير سير نقل الحركة إلى المروحة (إن وجد) ، بالإضافة إلى تنظيف أسطح انتقال الحرارة من جهة الماء والهواء . كما تشمل الصيانة تنظيف حوض تخزين الماء بقاع المكثف والتأكد من عمل نظام معالجة الماء بشكل مرض . أيضاً يجب إزالة القشور التي قد تكون على سطح انتقال الحرارة من جهة الماء ومراقبة نمو التآكل على هذه الأسطح والحد منه ، واستبدال الأسطح المتآكلة عند الضرورة .

٤ . ٩ مقارنة أنواع المكثفات المختلفة

لا يمكن بسهولة لمصمم نظام التبريد اختيار أحد أنواع المكثفات وتفضيله على الأنواع الأخرى من المكثفات قبل القيام بدراسة مستفيضة لتدعيم اختياره . ويعتمد الاختيار عامة على التكلفة الأولية الإجمالية للمكثف والمعدات الأخرى المساعدة ، كمضخات المياه وأبراج التبريد (إن وجدت) للمكثفات المبردة بالماء ، أو موتور المروحة مثلاً للمكثفات

المبردة بالهواء . كما يعتمد الاختيار أيضاً على تكلفة تشغيل المكثف والمعدات الأخرى المساعدة له . وعموماً ، يمكن القول أنه عند توفر مصدر رخيص من المياه فإن المكثفات المبردة بالماء تكون أفضل من المكثفات المبردة بالهواء والمكثفات التبخيرية ، إلا أنه يبقى دائماً السؤال ما المقصود بمصدر رخيص ، وإلى أي مدى يعتبر سعر الماء رخيصاً . وهذا بالضرورة يُلزم إجراء تحليل كامل وتفصيلي للتكلفة كما بينا سابقاً .

يمتاز الهواء كوسيط تبريد مقارنة بالماء بأنه لا سعر له ، ومتوفر في أي مكان وبأي كمية ، إلا أن للهواء عيبين رئيسيين : أولهما صغر حرارته النوعية وكذلك معامل التوصيل الحراري له بالمقارنة بقيم هاتين الخاصيتين للماء ، أما ثاني العيبين فيكمن في ارتفاع درجة حرارة الهواء الجوي دائماً عن درجة حرارة الماء . وينشأ عن هذين العيبين ارتفاع درجة حرارة المكثف المبرد بالهواء مقارنة بما إذا تم التبريد بالماء . أما المكثفات التبخيرية فتماثل درجة حرارة التكثيف بها درجة حرارة المكثفات المبردة بالماء تقريباً . وينتج عن ارتفاع درجة حرارة المكثف كما بينا سابقاً ارتفاع ضغط المكثف ، وانخفاض التأثير التبريدي بالمبخر ، وارتفاع قيمة قدرة الانضغاط لكل كيلووات تبريد بالمبخر . وهو ما يعني زيادة تكلفة التشغيل . ويسبب ارتفاع ضغط المكثف ضرورة أن تكون أنابيب المكثف من مواد أكثر متانة أو بسمك أكبر نسبياً لتحمل هذه الزيادة في الضغط . أيضاً يتسبب ارتفاع ضغط المكثف في قصر عمر الضاغط بالمقارنة بضاغط مماثل يعمل مع المكثف المبرد بالماء أو مكثف تبخيري عند نفس ظروف التشغيل الأخرى ، كما يؤدي ارتفاع ضغط المكثف إلى كبر سعة الضاغط التي تزيد عادة بحوالي من ١٠٪ إلى ٢٠٪ من سعة ضاغط مماثل يعمل مع مكثف مبرد بالماء . ويعني هذا ارتفاع التكلفة الأولية للضاغط الذي يعمل مع مكثف مبرد بالهواء مقارنة بالمكثفات الأخرى .

ومن ناحية أخرى تمتاز المكثفات المبردة بالهواء ببساطة تصميمها وصغر حجمها الكلي مقارنة بالمكثفات المبردة بالماء أو المكثفات التبخيرية . أيضاً تمتاز مكثفات الهواء

بسهولة تركيبها دون الحاجة إلى احتياطات خاصة لذلك كما هي العادة في المكثفات الأخرى. ولا تحتاج مكثفات الهواء إلى معدات أخرى مساعدة غير المروحة وموتورها (إذا لم تُدَار المروحة مباشرة بموتور الضاغط كما هو الحال في بعض الأحيان) ، أما المكثفات المبردة بالماء والمكثفات التبخيرية فتحتاج إلى مضخات لضخ الماء بالإضافة إلى نظم معالجة للماء أثناء التشغيل لمنع أو تأخير عملية تكوين القشور ولحماية مادة المكثف من التآكل . أيضاً تزيد التكلفة الأولية للمكثفات المبردة بالماء مقارنة بالمكثفات الأخرى ، إذا تطلب النظام برج تبريد لتوفير استهلاك ماء التبريد .

وبمقارنة الصيانة لأنواع المكثفات الثلاثة ، تعتبر المكثفات المبردة بالهواء أفضل هذه الأنواع على الإطلاق ، فهي تحتاج إلى صيانة بسيطة وسهلة نسبياً حيث تنظف من الخارج فقط لإزالة الأتربة العالقة بها مع عدم وجود ترسيب قشور كما هو الحال مع تبريد الماء ، وانخفاض التآكل أو انعدامه في تبريد الهواء مقارنة بتبريد الماء ، مالم يكن الجو المحيط رطباً . وإذا ما قارنا المكثفات التبخيرية بالمكثفات المبردة بالماء نجد أن الأولى أكثر تعرضاً لترسيب الأملاح من الثانية نظراً لتعرض سطحها للبلل والجفاف المتتالي مما يزيد من فرصة ترسيب الأملاح ، كما أنها أيضاً أكثر عرضة للتآكل لتعرض سطحها للماء والهواء معاً وهما عاملان مسببان للتآكل ، خلافاً للمكثفات المبردة بالماء المعرضة للماء فقط .

وتمتاز المكثفات التبخيرية عن المكثفات المبردة بالماء بعدة صفات أهمها انخفاض تكلفتها الأولية بالمقارنة بالمكثفات المبردة بالماء والمستخدمة لأبراج تبريد ، وانخفاض قدرة المضخات اللازمة لسريان الماء نظراً لانخفاض معدل سريان الماء في المكثفات التبخيرية ، وكذلك انخفاض فقد الضغط بها مقارنة بالمكثفات المبردة بالماء .

أما أهم عيوب المكثفات المبردة بالهواء على الأطلاق فهو اعتمادها على درجة

حرارة الجو المحيط . فمثلاً في أشد الأيام حرارة ترتفع درجة حرارة المكثف بشكل ملحوظ مما يعني انخفاض التأثير التبريدي لنظام التبريد عند أشد الأوقات حاجة إلى زيادة التبريد أو ثباته على الأقل . أما المكثفات المبردة بالماء أو المكثفات التبخيرية فلا تتأثر كثيراً بدرجة حرارة الجو المحيط نظراً لثبات درجة حرارة الماء تقريباً مما يعني ثبات سعة تبريد نظام التبريد ، وإن كانت المكثفات التبخيرية تعتمد في أدائها على درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء (وليس درجة حرارة البصيلة الجافة) مما يعني تغير أدائها بتغير هذه الدرجة ، وعليه فإنه لا يمكن استخدام المكثفات التبخيرية في الأجواء الرطبة .

٤.١٠ الغازات غير قابلة التكثيف

تعرف الغازات غير قابلة التكثيف بأنها الغازات التي توجد داخل المكثف مع بخار المبرد إلا أنها لا يمكن أن تتكثف عند درجة حرارة المكثف وضغطه . وتوجد مثل هذه الغازات نتيجة وجود الهواء داخل المكثف . ويوجد الهواء في المكثف من مصدرين : إما أن يوجد أصلاً داخل مكونات النظام المختلفة قبل القيام بعملية شحن النظام بالمبرد ، فإذا لم يُفَرغ النظام جيداً من هذا الهواء وجد جزء منه داخل المكثف أثناء التشغيل ، وإما ، يتسرب الهواء المحيط إلى مكونات نظام التبريد التي تعمل عند ضغط أقل من الضغط الجوي وذلك خلال بعض الوصلات التي قد تكون غير محكمة .

بوجود الهواء داخل نظام التبريد ، أياً كان السبب ، ينقسم هذا الهواء إلى قسمين : القسم الأول هو الغازات غير قابلة التكثيف مثل الأكسجين والنيتروجين ، والقسم الثاني هو بخار الماء الذي يتكثف في المكثف مكوناً الماء الذي يُخْلَط مع بعض أنواع المبردات مكوناً أحماضاً تعمل على تآكل بعض مكونات نظام التبريد . أما الغازات غير قابلة التكثيف فإنها تتراكم في الجزء العلوي من المكثف ، خاصة في المكثفات المبردة بالماء من نوع الغلاف والأنبوب ، ويتسبب وجود هذه الغازات بالمكثف في الآتي :

أ) رفع الضغط الكلي بالمكثف نتيجة وجود ضغط جزئي لهذه الغازات ، مما يستلزم زيادة قدرة الانضغاط بالضاغط .

ب) تراكم هذه الغازات على سطح انتقال الحرارة بالمكثف مما يؤدي إلى وجود مقاومة حرارية من جهة المبرد ، تؤدي إلى رفع الفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين بخار المبرد ومائع التبريد ، وهذا بالتالي يعمل على رفع ضغط المكثف ومن ثم زيادة قدرة الانضغاط بالضاغط .

وقد يعمل وجود الأكسجين غير القابل للتكثيف في بعض النظم على أكسدة زيت التزييت ، وذلك إذا وصل الأكسجين إلى نقطة خروج بخار المبرد من الضاغط - حاملاً معه زيت تزييت - حيث تكون درجة الحرارة مرتفعة نسبياً مما يشجع على عملية التأكسد .

ويلزم في النظم الكبيرة ، وكذا في النظم المستخدمة لمبردات منخفضة الضغط بطبيعتها ، كمبرد ١١ ، وجود نظام تفريغ يعمل بطريقة دورية ، إما يدوياً أو أوتوماتياً ، للتخلص من الغازات غير قابلة التكثيف . عندئذ تسحب هذه الغازات من نقطة في أعلى المكثف ، وبالطبع يسحب معها جزء من بخار المبرد ، ثم يتم فصل بخار المبرد عن هذه الغازات ، فتطرد الغازات غير قابلة التكثيف إلى الهواء الجوي ويعود بخار المبرد بعد تكثيفه إلى نقطة دخول المبخر . وفي هذه الحالات يجب تعويض ما قد يفقد من المبرد من النظام بطريقة ما . أما في النظم الصغيرة فيجب أن تفرغ مكونات النظام جيداً أولياً قبل شحنه بالمبرد والتأكد من أن جميع الوصلات محكمة ولا تسمح بتسرب هواء إلى النظام أثناء التشغيل .

ويمكن الكشف عن وجود الغازات غير قابلة التكثف بالمكثف بإيقاف دورة التبريد مع استمرار تبريد المكثف لفترة زمنية . مما يعني انخفاض درجة حرارة المبرد داخل المكثف إلى درجة حرارة دخول الماء (أو الهواء) ، المستخدم لتبريد المكثف . عندئذ يُقَارن ضغط المكثف بضغط التشبع للمبرد عند هذه الدرجة للحرارة ، وتكون قيمة الزيادة في

ضغط المكثف عن ضغط التشبع دليلاً لوجود غازات غير قابلة للتكثيف . وبالطبع تصلح هذه الطريقة فقط إذا كان مقدار هذه الغازات كبيراً نسبياً حتى يكون فرق الضغط محسوساً .

٤.١١ التحكم في ضغط المكثف

بتشغيل دورة التبريد ، يتغير ضغط المكثف إما ارتفاعاً أو انخفاضاً ، نتيجة تغير ظروف التشغيل الداخلية (كتغير درجة حرارة المبخر مثلاً) ، أو تغير ظروف التشغيل الخارجية (كتغير درجة حرارة ماء التبريد أو هواء التبريد مثلاً) ، أو تغير كليهما معاً . وتتغير درجة حرارة المبخر نتيجة زيادة أو نقصان حمل التبريد ، وينشأ عن تغير درجة حرارة المبخر تغير ضغط المبخر أيضاً . فبزيادة درجة حرارة المبخر ، يزيد ضغط المبخر ويتبع ذلك زيادة معدل سريان بخار المبرد إلى الضاغط مما يغير نقطة اتزان أداء الضاغط مع دورة التبريد ويستقر الضاغط عند نقطة اتزان جديدة يرتفع معها ضغط المكثف . إلا أن زيادة ضغط المكثف يسبب نقص التأثير التبريدي للمبخر كما بينا سابقاً مما يعني ارتفاع درجة حرارة المبخر مرة أخرى وبالتالي يرتفع ضغط المبخر ، وهكذا ، مما يسبب تحميل الضاغط وتسخينه مع احتمال تلف الضاغط وموتور إدارته . أما انخفاض درجة حرارة المبخر فتعني انخفاض ضغط المبخر وانخفاض معدل سريان بخار المبرد إلى الضاغط ، فتتغير نقطة اتزان أداء الضاغط مع نظام التبريد ويستقر عند نقطة اتزان جديدة ينخفض معها ضغط المكثف . وبانخفاض ضغط المكثف يزيد التأثير التبريدي للمبخر فتنخفض درجة حرارة المبخر مرة أخرى ، وهكذا ، فيصبح أداء الدورة غير مستقر وقد يسبب هذا طفح سائل مرتد إلى الضاغط .

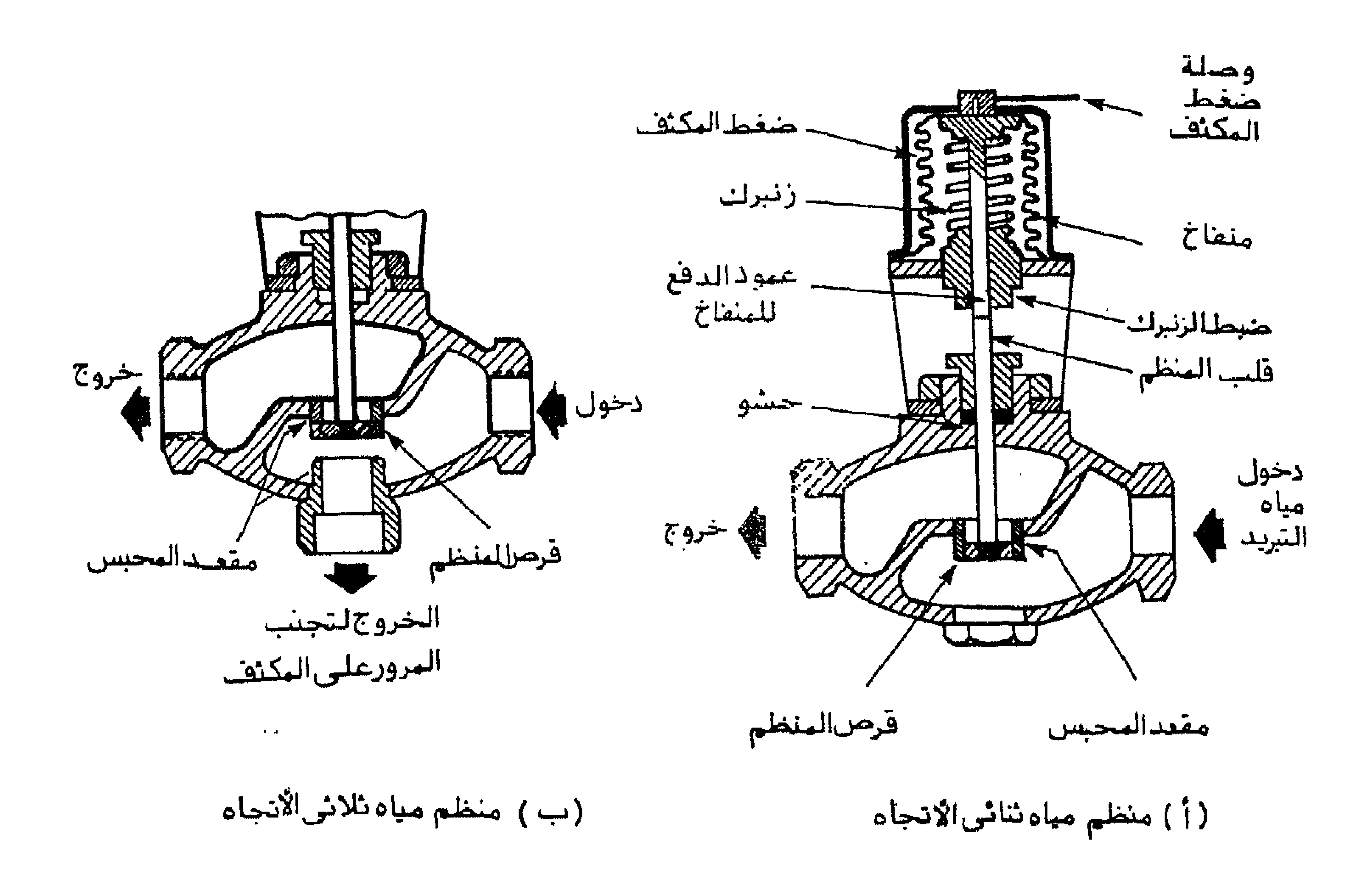
يتغير ضغط المكثف أيضاً بتغير ظروف التشغيل الخارجية مثل معدل سريان ماء أو هواء تبريد المكثف أو درجة حرارتيهما . فمثلاً بارتفاع درجة حرارة الماء أو الهواء أو

انخفاض معدل سريانيهما خلال المكثف ، ترتفع درجة حرارة المكثف وبالتالي ضغطه مما يعني زيادة تحميل الضاغط وتسخينه مما يعرضه للتلف . أيضاً بانخفاض درجة حرارة ماء أو هواء التبريد ، أو زيادة معدل سريانيهما ، تنخفض درجة حرارة المكثف وبالتالي ضغطه . وينشأ عن انخفاض ضغط المكثف عدم وجود فرق ضغط كاف لتشغيل محبس التمدد خاصة في التطبيقات التي تعمل عند درجة حرارة مبخر مرتفعة نسبياً .

مما تقدم يتضح أهمية المحافظة على ضغط ثابت بالمكثف لضمان أداء جيد بدورة التبريد ولحماية الضاغط وموتوره من التلف وإطالة عمرهما . لذا تستخدم عدة أنواع من حاكمات ضغط المكثف للمحافظة على هذا الضغط ثابتاً . ويعتمد اختيار أي من هذه الأنواع على نوع المكثف المستخدم ، وعلى محتويات دورة تبريد المكثف . وتعمل جميع هذه الحاكمات بإشارة تحكم من ضغط المكثف مباشرة أو بإشارة تحكم من درجة حرارة المكثف أو أى متغير آخر .

٤.١١.١ التحكم في ضغط المكثفات المبردة بالماء

يتم التحكم في معدل سريان ماء تبريد المكثف باستخدام منظم مياه يعمل على تغيير معدل السريان للمحافظة على ضغط المكثف ثابتاً . فإذا كان نظام دوران الماء هو نظام إهدار الماء (ارجع إلى الجزء الخاص بنظم إمداد المكثف بالماء) أُستُخْدِمَ منظم مياه ثنائي الاتجاه كالموضح بشكل ٤.٢٢ . ويوضع هذا المنظم في خط الخروج من المكثف لضمان امتلاء المكثف دائماً بماء التبريد بغض النظر عن معدل سريان ماء التبريد إليه وذلك لإبطاء عملية تكون القشور على سطح المكثف والتي يتزايد معدلها بزيادة عدد المرات المتتابعة لبلل سطح المكثف وتجفيفه (إذا لم يمتلء المكثف بالماء في بعض الأحيان) . ويعمل منظم المياه ثنائي الاتجاه باتزان ضغط زنبرك (يحدد مسبقاً ويمكن التحكم فيه) وضغط المكثف . فعند بداية التشغيل - مثلاً - يبدأ ضغط المكثف في الارتفاع حتى يصل إلى قيمة



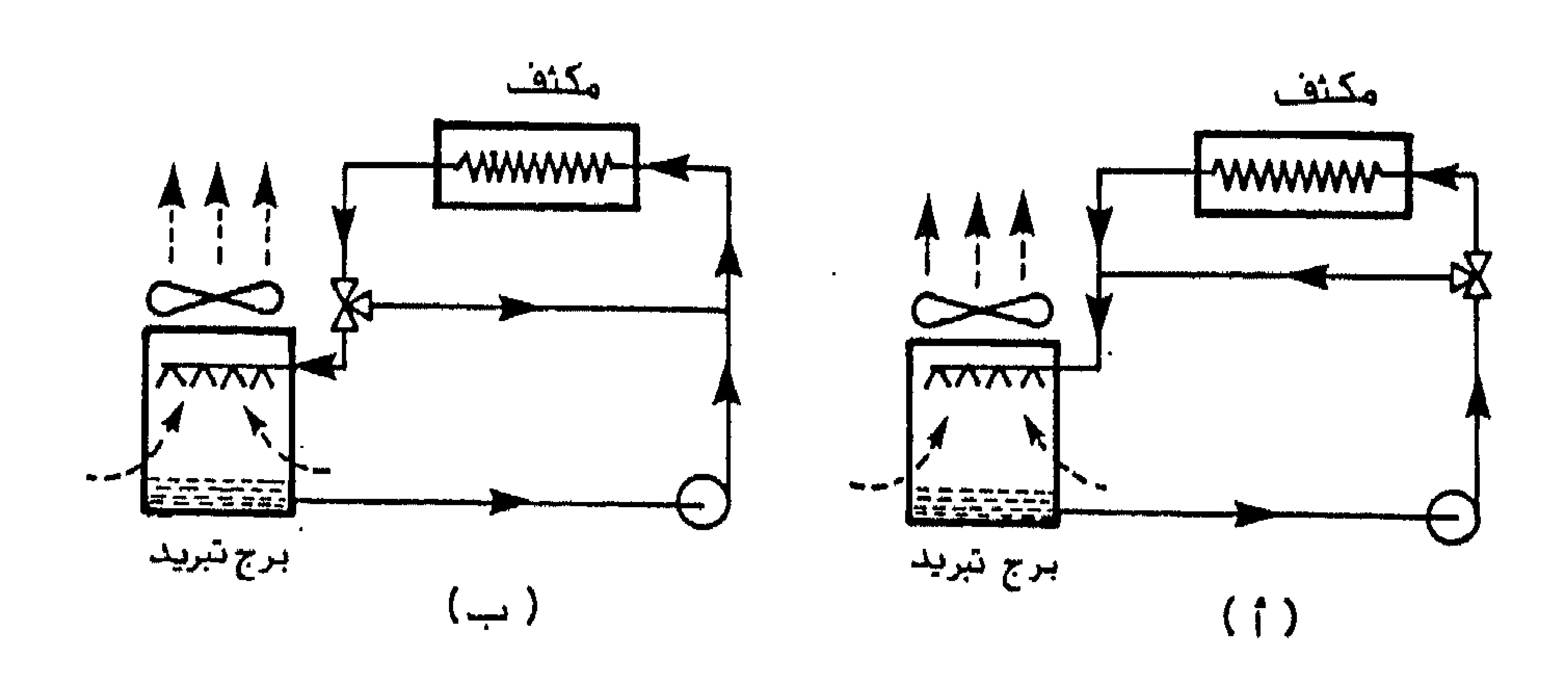
شكل ٤.٢٢ منظمات مياه تبريد المكثف .

ضغط الزنبرك فيبدأ المنظم في الفتح ليسمح بمرور مياه التبريد إلى المكثف . ويستمر المنظم في توسعة فتحة مرور المياه كلما استمرت زيادة ضغط المكثف للمحافظة على هذا الضغط ثابتاً في حدود معينة . أما عند إيقاف الضاغط فيبدأ ضغط المكثف في الانخفاض حتى يصبح أقل من ضغط الزنبرك فيبدأ المنظم في الغلق . ومن عيوب هذا النوع من المنظمات أنه في حالة ما إذا تطلب التشغيل معدلات منخفضة من ماء التبريد فإنه يحتمل أن تتلف مضخة دوران المياه (إذا وجدت) نتيجة عدم وجود سريان كاف بها . أما أهم مميزات هذا المنظم فهو استهلاك المياه بالقدر اللازم فقط للمكثف .

ويوضح شكل ٤.٢٢ أيضاً منظم مياه ثلاثي الاتجاه . ويعمل هذا المنظم مع نظم

إعادة إمداد المياه المستخدمة لبرج تبريد . ويتم التحكم في هذا المنظم بضغط المكثف وضغط الزنبرك أيضاً ، بنفس طريقة عمل منظم المياه ثنائي الاتجاه . ويوضع هذا المنظم بخط المياه الداخل إلى المكثف ويعمل على تنظيم معدل سريان الماء إلى المكثف بتجنيب جزء من السريان واعادته إلى برج التبريد دون المرور بالمكثف ، كما هو موضح بشكل ٤.٢٣ (أ) . ويلزم عند استخدام هذا المنظم ضمان أن تعمل دورة المياه بالمكثف – من خلال تصميم المكثف ووضعه بالنسبة لبرج التبريد ، أو تصميم خط المياه الراجع من المكثف إلى برج التبريد – على المحافظة على امتلاء المكثف بالماء لنفس السبب الذي وضحناه سابقاً .

وفي بعض الطرق الأخرى يوضع منظم المياه الثلاثي الاتجاه كما هو موضح بشكل ٤.٢٣ (ب) لتجنيب اعادة ماء التبريد العائد من المكثف إلى برج التبريد وخلط هذا الجزء مع الماء الداخل إلى المكثف مما يعمل على رفع درجة حرارة ماء التبريد إلى المكثف وبالتالي رفع ضغط المكثف . وتستخدم بعض النظم حاكم لسرعة مروحة الهواء ببرج



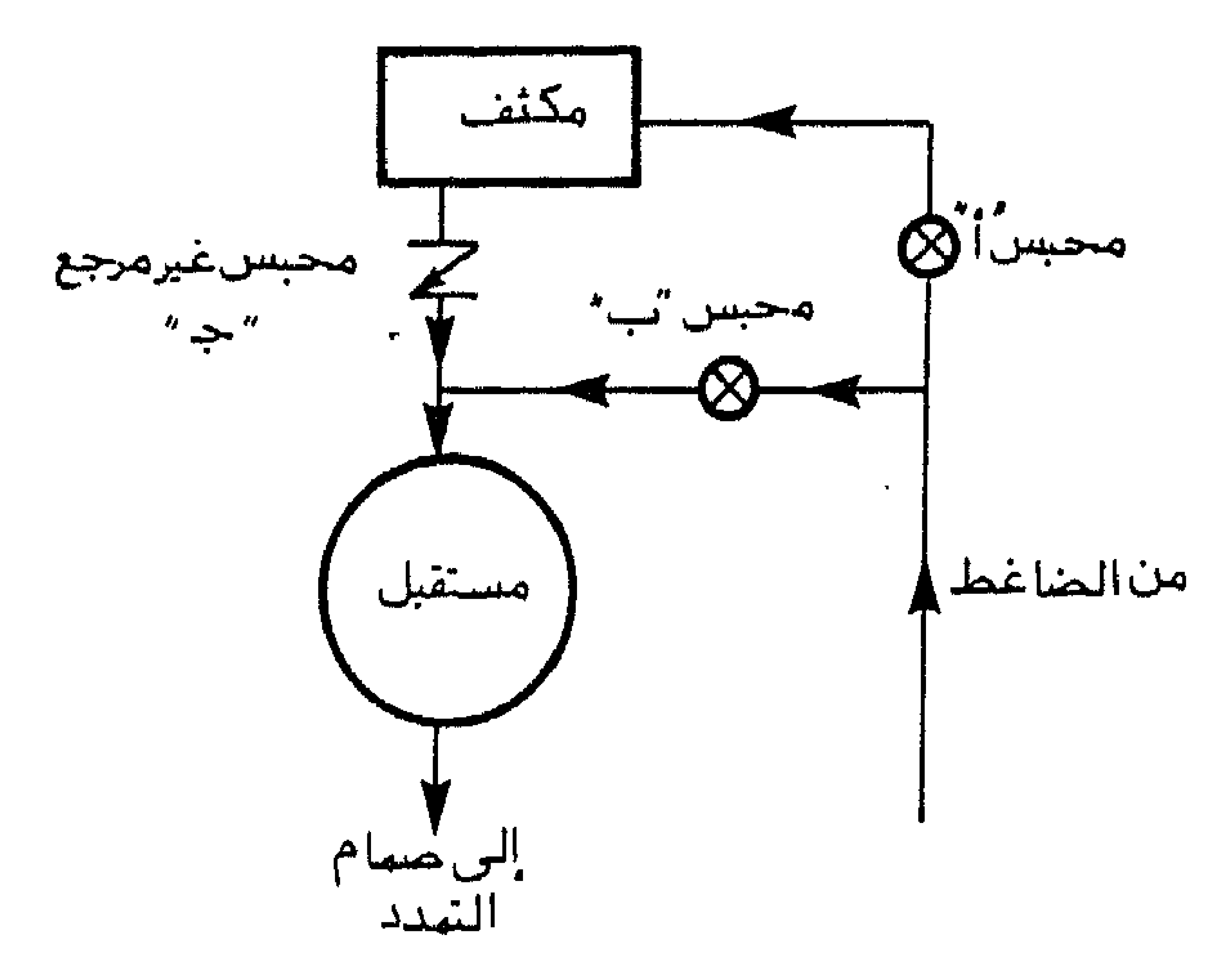
شكل ٤.٢٣ استخدام منظم مياه ثلاثي الاتجاه لتنظيم ضغط المكثف . (أ) وضع المنظم في خط دخول المياه إلى المكثف ، (ب) وضع المنظم في خط خروج المياه من المكثف .

التبريد أو حاكم لفتحات دخول الهواء إلى برج التبريد مما يعمل على التحكم في معدل سريان الهواء إلى البرج وبالتالي التحكم في درجة حرارة الماء الخارج من البرج مما يكون له أثره في التحكم في ضغط المكثف .

٤.١١.٣ التحكم في ضغط المكثفات المبردة بالهواء

يتم التحكم في ضغط المكثفات المبردة بالهواء بواحدة أو أكثر من الطرق الآتية . في الطريقة الأولى يكون التحكم بتشغيل أو إيقاف مروحة الهواء بالمكثف . ويتم تشغيل أو إيقاف المروحة بناء على درجة حرارة الجو المحيط وليس تبعاً لضغط المكثف مباشرة ، وذلك لمنع التغيرات السريعة في ضغط المكثف والتي قد تسبب الإيقاف والتشغيل المتتالي والذي قد يؤدي إلى تلف موتور المروحة ، وحدوث شططان في أداء دورة التبريد . ولا تصلح هذه الطريقة للنظم وحيدة المكثف ، ولكنها تصلح عندما يتعدد عدد المكثفات الموجودة بالنظام ، وبالتالي يتعدد عدد المراوح المستخدمة لسريان الهواء . عندئذ تستخدم هذه الطريقة لإيقاف أو تشغيل المراوح واحدة تلو الأخرى تبعاً لدرجة حرارة الجو المحيط مما يعمل على حفظ ضغط المكثف ثابتاً ما أمكن .

في الطريقة الثانية يتم التحكم في خانقات الهواء بممرات سريان الهواء من أو إلى المكثف . وتعمل هذه الخانقات على التحكم في سريان الهواء إلى المكثف وبالتالي التحكم في ضغطه . ويتم تشغيل هذه الخانقات إما بإشارة من حاس درجة حرارة الجو وإما بإشارة من حاس ضغط المكثف . وفي الطريقة الثالثة للتحكم في ضغط المكثف ، يُستَخدم موتور مروحة متغير السرعات ، وتتغير سرعة دوران المروحة تبعاً لإشارة من حاس درجة حرارة الجو أو من حاس ضغط المكثف ، وبتغير سرعة دوران المروحة يتغير معدل سريان الهواء إلى المكثف مما يعمل على تثبيت ضغط المكثف .



شكل ٤.٢٤ نظام تحكم داخلي في ضغط مكثف مبرد بالهواء .

وهناك طرق أخرى للتحكم في ضغط المكثفات المبردة بالهواء . في مثل هذه الطرق يتم التحكم داخلياً من خلال دورة التبريد نفسها في ضغط المكثف . ويمثل شكل ٤.٢٤ أحدى هذه الطرق . وتُسْتَخدَم هذه الطريقة إذا حوى نظام التبريد مستقبلاً لتخزين سائل المبرد . عندئذ يستخدم المحبس " أ " الذي يفتح أتوماتياً إذا مازاد ضغط الدخول إليه عن حد معين ، والمحبس "ب" الذي يفتح أتوماتياً إذا ما قل ضغط المستقبل عن حد معين . ويوضع المحبس " أ " في خط دخول الغاز الساخن إلى المكثف كما يوضع المحبس "ب" في خط تجنيبي بين خط الغاز الساخن ودخول المستقبل ، هذا بالإضافة إلى وضع محبس غير مرجع "جـ" بين المكثف والمستقبل ، كما هو موضح بشكل ٤.٢٤ .

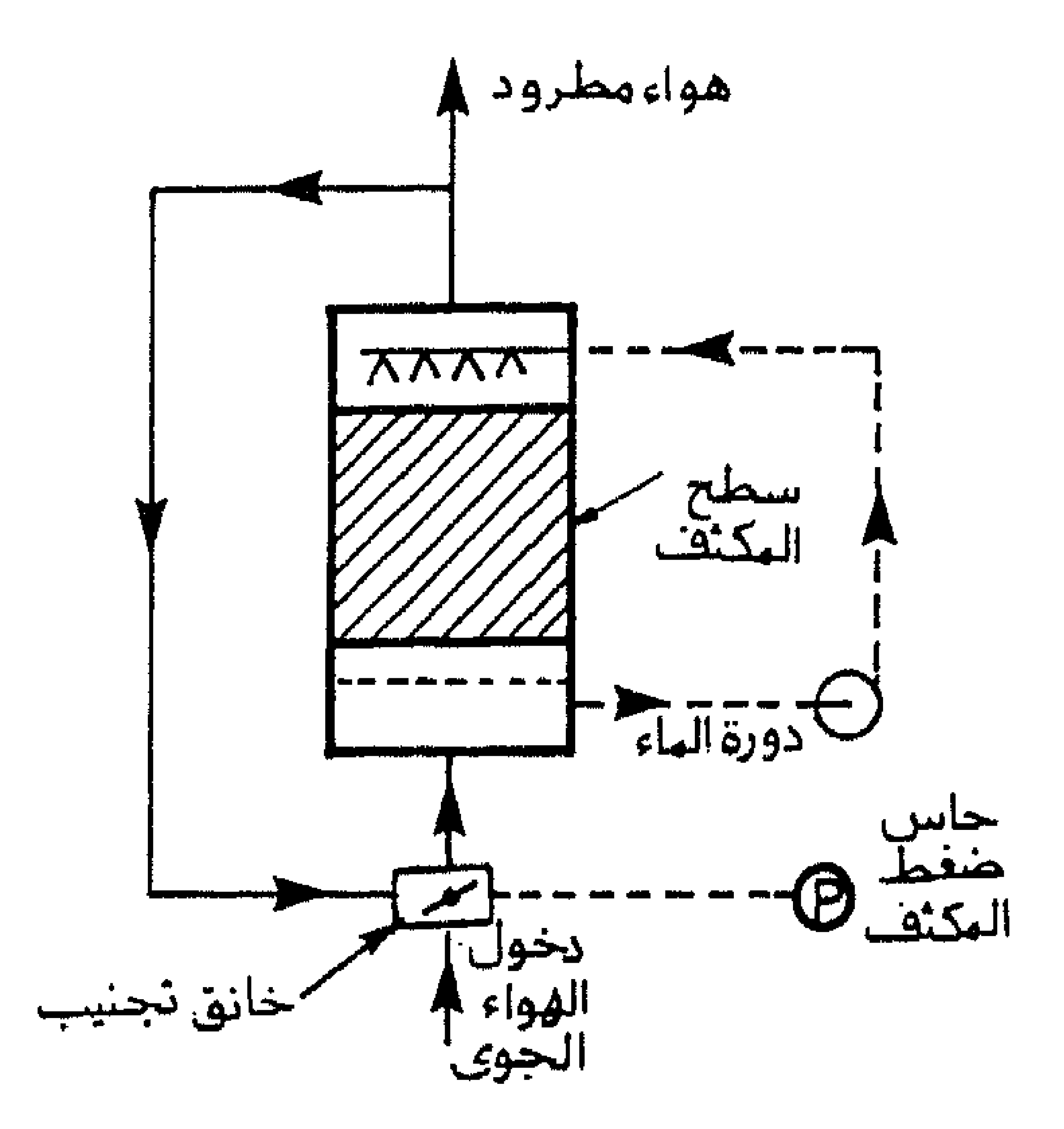
يعمل نظام التحكم الموضح عاليه لحماية دورة التبريد من خفض ضغط المكثف نتيجة انخفاض درجة حرارة الجو المحيط . ويعمل نظام التحكم كما يلي . بانخفاض ضغط المكثف عن حد معين ينخفض ضغط الطرد بالضاغط وكذا ضغط المستقبل . عندئذ يغلق المحبس " أ " أوتوماتياً ويفتح المحبس "ب" أوتوماتياً أيضاً ، فيتحول سريان الغاز الساخن من الضاغط إلى المستقبل مباشرة دون المرور على المكثف مما يؤدي إلى : أولاً تكثيف هذا

الغاز بالمستقبل مما يعمل على رفع ضغط المستقبل تدريجياً وبالتالي رفع ضغط الطرد أيضاً بالضاغط ، ثانياً يمنع هذا الغاز سائل المبرد الموجود بالمكثف من السريان إلى المستقبل . بزيادة ضغط الطرد بالضاغط يبدأ المحبس " أ " في الفتح تدريجياً ويبدأ المحبس "ب" في الغلق تدريجياً أيضاً . عندئذ يُقَسَّم الغاز الساخن ، تبعاً لمقدار فتحة كل محبس ، بين المكثف والمستقبل . يكثف الغاز الساخن بالمكثف ونظراً لصعوبة سريان هذا السائل إلى المستقبل كما بينا ، يرتفع مستوى السائل بالمكثف مما يؤدي إلى تصغير المساحة المؤثرة لانتقال الحرارة بالمكثف . عندئذ يرتفع ضغط المكثف فيبدأ المحبس " أ " في توسعة فتحته والمحبس "ب" في تضيق فتحته تدريجياً ، وهكذا .

ويوجد عدة نظم أخرى للتحكم الداخلي في ضغط المكثف ، تختلف فيما بينها تبعاً للشركة المصنعة لنظام التحكم ، ولمزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى الشركات المصنعة لنظم التبريد واستشارتها .

٤.١١.٣ التحكم في ضغط المكثفات التبخيرية

هناك عدة طرق للتحكم في ضغط المكثفات التبخيرية . في الطريقة الأولى يعمل حاس ضغط المكثف على تشغيل أو إيقاف مروحة هواء المكثف . وتمتاز هذه الطريقة بسهولة التحكم ، إلا أن من أهم عيوبها التشغيل والإيقاف المتتابع لموتور المروحة مما قد يؤدي إلى تلفه ، بالإضافة إلى إحتمال حدوث شطان بدورة التبريد . في الطريقة الثانية، يقوم حاس ضغط المكثف بتغيير سرعة دوران مروحة الهواء مما يغير معدل سريان الهواء خلال المبخر فيتم التحكم في ضغط المكثف . في الطريقة الثالثة يقوم حاس ضغط المكثف بالتحكم في فتحات خنق الهواء الداخل أو الخارج إلى / أو من المكثف لتغيير معدل سريانه . وقد تعمل هذه الطريقة للتحكم في خانق هواء لتجنيب طرد بعض الهواء العائد من المكثف وإعادة هذا الجزء إلى المكثف مرة أخرى كما هو موضح بشكل ٤.٢٥ ، ويساعد



شكل ٤.٢٥ التحكم في ضغط المكثف باستخدام خانق تجنيب لخلط جزء من الهواء المطرود من المكثف بالهواء الجوي الداخل للمكثف .

هذا على رفع الرطوبة النسبية للهواء عند دخول المكثف مما يعمل على رفع درجة حرارة المكثف (لارتفاع درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء الوارد للمكثف) وبالتالي رفع ضغط المكثف .

وهناك طريقة أخرى للتحكم في ضغط المكثف . وفي هذه الطريقة يتحكم حاس ضغط المكثف في تشغيل أو إيقاف مضخة رش الماء في المكثف التبخيري ، فيصبح المكثف مبرداً بالهواء فقط مما يعمل رفع ضغط المكثف . وتستخدم هذه الطريقة عادة مع أحد الطرق الأخرى المعطاه عاليه لتوسيع مدى التحكم في ضغط المكثف للوصول إلى تحكم دقيق في ضغطه . ومن أهم عيوب هذه الطريقة – كما وضحنا سابقاً – تعرض سطح المكثف لتكوين القشور نتيجة دورات البلل والجفاف التي يتعرض لها سطح المكثف ، مما يزيد من تكلفة صيانة المكثف .

٥

الضواغط الترددية

١.٥ أهمية الضواغط وأقسامها

يعتبر الضاغط القلب النابض لدورة التبريد ، فهو المسئول عن دوران المبرد داخل دورة التبريد بالمعدل المطلوب تبعاً لحمل التبريد . ويستخدم الضاغط أساساً لرفع ضغط المبرد من ضغط المبخر إلى ضغط المكثف . وتعتمد كفاءة دورة التبريد إلى حد كبير على كفاءة أداء الضاغط لعمله .

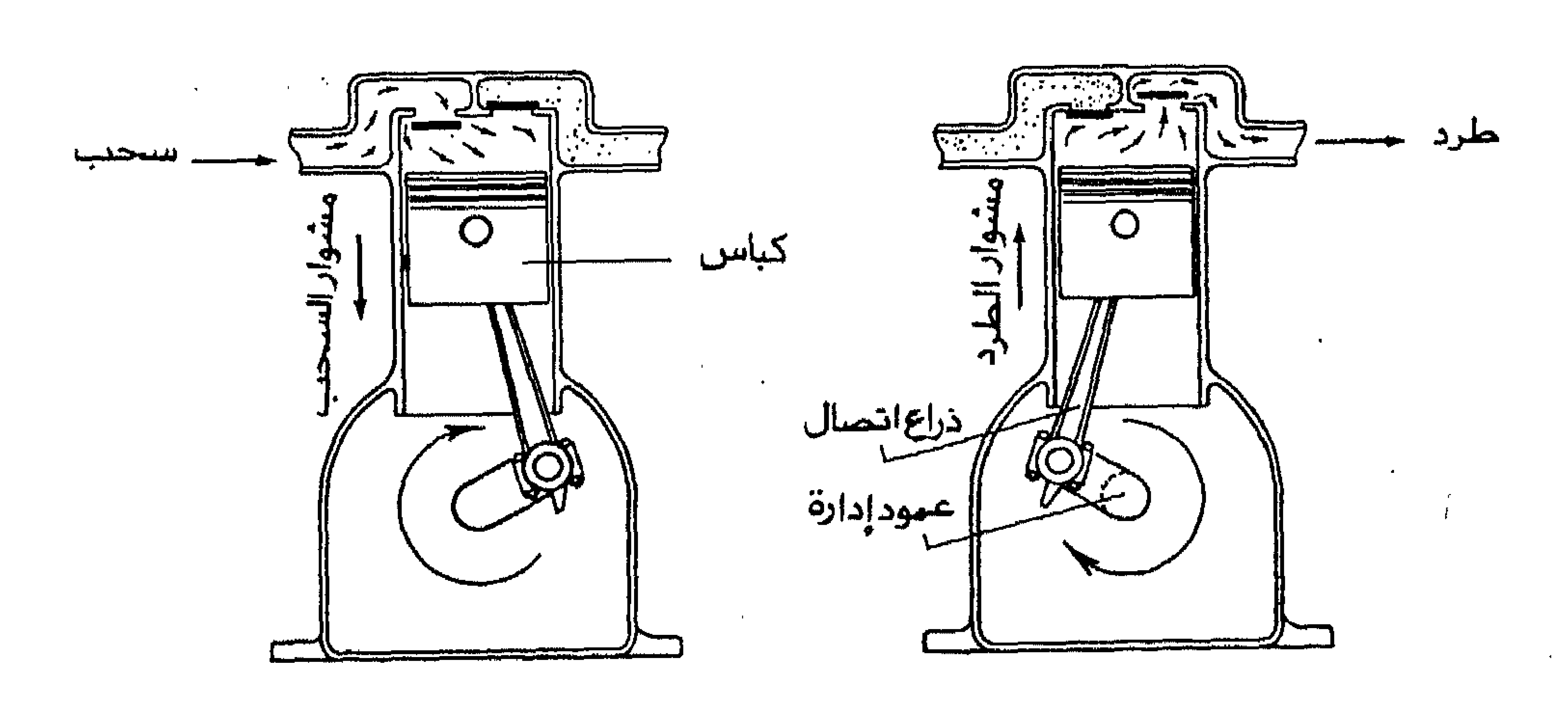
تنقسم الضواغط الموجودة في صناعة التبريد من حيث الطريقة المستخدمة لعملية الانضغاط إلى قسمين أساسيين هما : الضواغط موجبة الإزاحة والضواغط الديناميكية . ففي القسم الأول تتم عملية الانضغاط نتيجة تقليل حجم الغاز أو البخار داخل الضاغط مما يعمل على رفع ضغطه ، ويضم هذا النوع من الضواغط : الضواغط الترددية ، والضواغط

الدورانية (وتعرف أيضاً بالضواغط ذوات الأرياش) ، والضواغط اللولبية . ويضم القسم الثاني من الضواغط ضواغط الطرد المركزي ، وفيها تتم عملية الانضغاط بقوة الطرد المركزي .

ونظراً لكون الضواغط الترددية هي أكثر الضواغط استخداماً في صناعة التبريد فسيخصص الفصل الحالي لهذا النوع من الضواغط ، وستعرض باقي أنواع الضواغط في الفصلين التاليين .

٥.٣ الضواغط الترددية : فكرة التشغيل وأنواعها

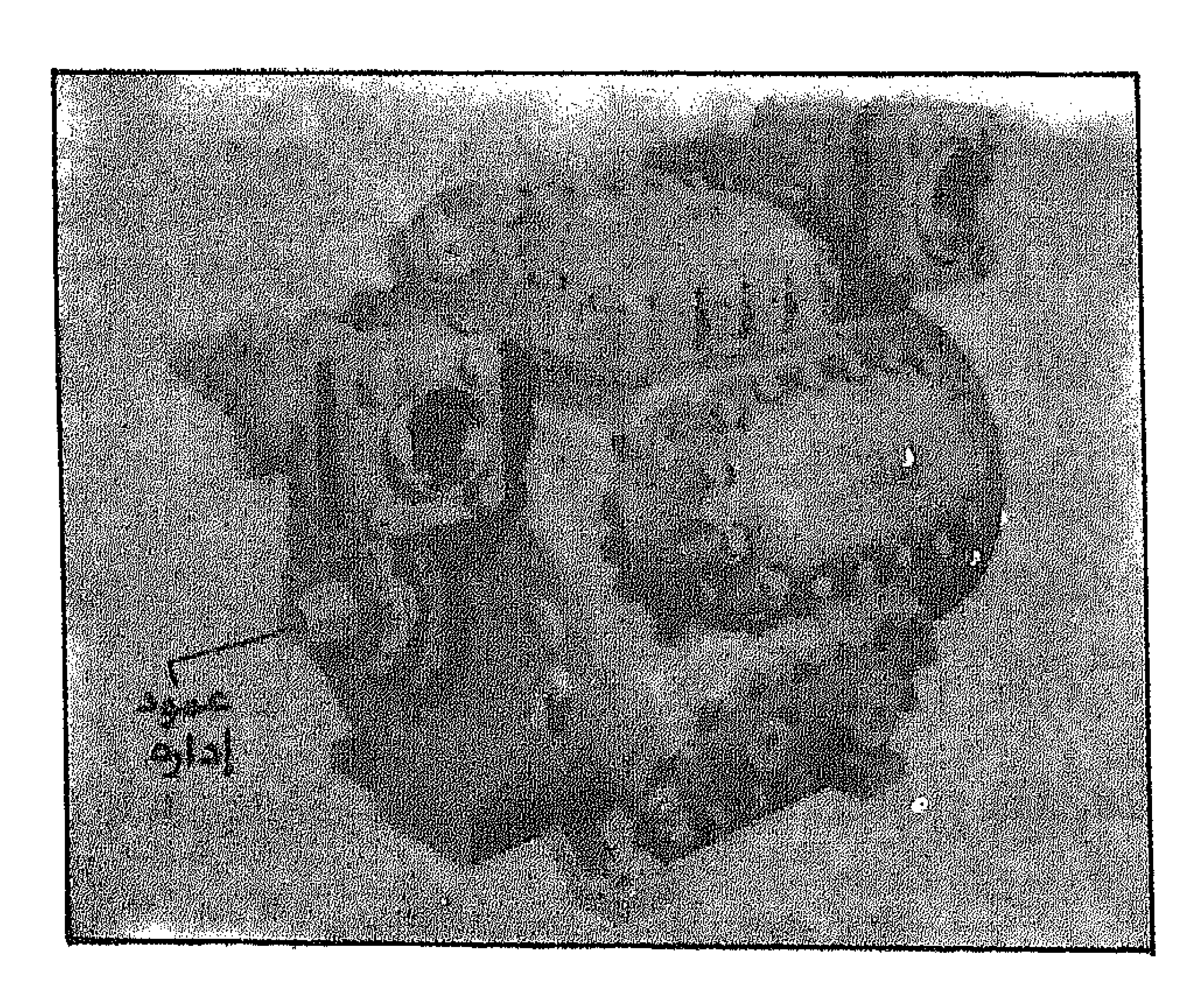
تعتبر الضواغط الترددية هي أكثر الضواغط شيوعاً في مجال التبريد . وتستخدم هذه الضواغط مع نظم الهالوكربونات والأمونيا على السواء . ويتكون الضاغط الترددي كما هو مبين بشكل ٥.١ من كباس يتحرك داخل أسطوانة مسدودة النهاية . وتعرف نهاية الأسطوانة برأس الأسطوانة وتحوي عادة صمامي دخول وخروج المبرد إلي ومن



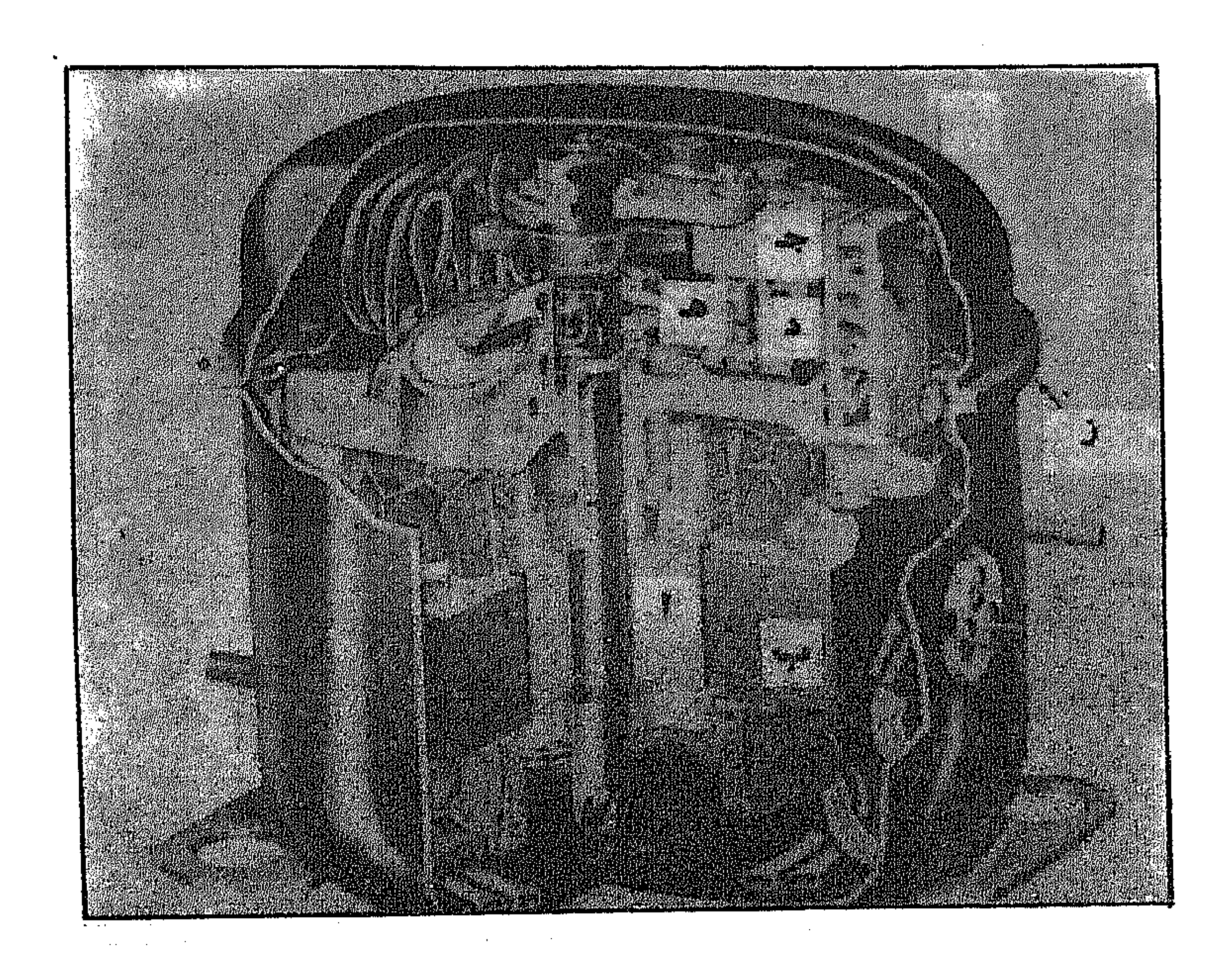
شكل ٥.١ رسم تخطيطي للفكرة الأساسية لعمل الضاغط .

الأسطوانة . ويتحرك الكباس داخل الأسطوانة تبعاً لدوران عمود إدارة يتصل بالكباس بذراع اتصال . وبدوران عمود الإدارة دورة كاملة يتحرك الكباس داخل الأسطوانة مشواريين أحدهما يسمى مشوار السحب والآخر يسمى مشوار الطرد ، كما هو مبين بالشكل . ففي مشوار السحب ، تسبب حركة الكباس خفض ضغط الغاز داخل الأسطوانة نتيجة التمدد (أي زيادة حجم الغاز) ، فإذا قل ضغط الغاز داخل الأسطوانة عن ضغط خط السحب ، يُفَتح هذا الصمام ويُسْحَب الغاز إلى داخل الأسطوانة حتى نهاية مشوار السحب. فإذا وصل الكباس إلى أبعد نقطة له عن نهاية الأسطوانة يبدأ مشوار الطرد ، أي حركة الكباس في اتجاه نهاية الأسطوانة مما يعمل على رفع ضغط الغاز داخل الأسطوانة . بزيادة الضغط داخل الأسطوانة عن ضغط خط السحب يقفل صمام السحب في الحال . وباستمرار حركة الكباس في مشوار الطرد يستمر الضغط داخل الأسطوانة في الارتفاع حتى إذا زاد هذا الضغط عن ضغط خط الطرد ، فُتِحَ صمام الطرد عند نهاية الأسطوانة أتوماتياً فيسري الغاز إلى الخارج بضغط يعادل ضغط الطرد . فإذا وصل الكباس إلى أقرب نقطة ممكنة له من نهاية الأسطوانة ، يبدأ الكباس في العودة مرة أخرى لمشوار السحب مما يخفض الضغط داخل الأسطوانة ، فيغلق صمام الطرد فوراً ويستمر مشوار السحب كما قدمنا سابقاً .

وتستخدم الضواغط الترددية في العديد من تطبيقات التبريد . وتتوفر هذه الضواغط في الأسواق بقدرات تتروح بين ٩٠ وات إلى أكثر من ١٢٠ كيلووات للضاغط الواحد. ويمكن تقسيم الضواغط الترددية إلى عدة أقسام تبعاً للخاصية المختارة للتقسيم . فمثلاً تكون هذه الضواغط فردية الفعل أو مزدوجة الفعل . ويكون الضاغط فردي الفعل إذا تم السحب والطرد عند وجه الكباس فقط . أما إذا تم السحب والطرد عند وجه الكباس ونهايته كان الضاغط مزدوج الفعل . كما تقسم الضواغط الترددية أيضاً تبعاً لعدد مراحل رفع الضغط بها . فإذا عمل الضاغط على رفع الضغط في مرحلة واحدة كان الضاغط أحادي المرحلة ، أما إذا تم الضغط في مرحلتين كان الضاغط ثنائي المرحلة وهكذا .



شكل ٢.٥ ضاغط ترددي مفتوح [شركة ترين] .



شكل ٣.٥ مقطع في ضاغط محكم الغلق مبيناً أهم الأجزاء أ : دوار الموتور ، ب : ساكن الموتور ، جـ : أسطوانة الضاغط ، د : كباس الضاغط ، هـ : ذراع التوصيل ، و : عمود الإدارة ، ز : لحام العلبة من الخارج [شركة منتجات تيكيو مسه] .

وتقسم الضواغط تبعاً لميكانيكية نقل الحركة إلى الضاغط إلى نوعين أساسيين : هما الضاغط المفتوح والضاغط محكم الغلق . ففي النوع الأول يتم نقل الحركة إلى عمود إدارة الضاغط من موتور خارجي ، لذا يجب مد عمود الإدارة إلى خارج العلبة الحاوية للضاغط ، ويلزم ضمان عدم تسرب غاز أو بخار التبريد من حول عمود الإدارة ويجب اتخاذ الاحتياطات اللازمة لذلك . ويبين شكل ٥.٢ صورة فوتوغرافية لضاغط مفتوح .

ويتم نقل الحركة بين الموتور وعمود الإدارة في الضاغط المفتوح إما بسير وإما بإزدواج . أما في حالة الضاغط محكم الغلق فيوضع الضاغط والموتور في علبة واحدة محكمة الغلق وملحومة من الخارج كما هو مبين بشكل ٥.٣ ، وبالتالي تجرى صيانة الضاغط والموتور بالمصنع فقط . ويسري بخار المبرد من خط السحب خلال مكونات الموتور وعمود إدارة الضاغط قبل دخوله إلى صمام السحب بالضاغط . ويساعد هذا السريان على تبريد الموتور مما يحسن أداءه بدرجة محسوسة ، مع التضحية بزيادة القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط بمقدار بسيط نتيجة ارتفاع درجة حرارة البخار بخط السحب . ويمتاز الضاغط محكم الغلق بالتخلص من احتمال تسرب بخار المبرد من حول عمود الإدارة كما هو الحال بالضاغط المفتوح .

ويُعَرّف الضاغط نصف محكم الغلق بنفس الطريقة التي يعرف بها الضاغط المحكم الغلق ، إلا أنه لا يوجد لحامات بالعلبة الحاوية للضاغط والموتور ، وتستبدل اللحامات بمسامير ربط محكمة لسهولة فتح العلبة لصيانة الضاغط أو الموتور بالموقع .

وتستخدم نظم الهالوكربونات الضواغط الترددية المفتوحة ومحكمة الغلق ونصف محكمة الغلق في العديد من التطبيقات ، وتلاقي الضواغط محكمة الغلق رواجاً كبيراً في تطبيقات التبريد التي تحتاج إلى ضواغط صغيرة السعة مثل الثلاجات المنزلية ووحدات تكييف الشباك وغيرها ، حيث تمتاز هذه الضواغط بصغر حجمها وهدوئها النسبي

بالإضافة إلى انخفاض سعرها بالمقارنة بالضواغط المفتوحة . وتتوفر عادة الضواغط محكمة الغلق بقدرات تشغيل من ٩٠ وات إلى ١٨ كيلووات ، وتتوفر الضواغط نصف المحكمة الغلق بقدرات تشغيل من ٠.٣٧ إلى ١١٢ كيلووات ، أما الضواغط المفتوحة فتبدأ من ٠.١٢ كيلووات . وتستخدم نظم الأمونيا الضواغط المفتوحة فقط ، ولا يمكنها استخدام الضواغط محكمة الغلق أو نصف محكمة الغلق نظراً لتفاعل الأمونيا مع مواد الموتور . وتتوفر ضواغط الأمونيا المفتوحة عادة بالأسواق بقدرات تشغيل ابتداء من ٧.٥ كيلووات .

٥.٣ إزاحة الكباس

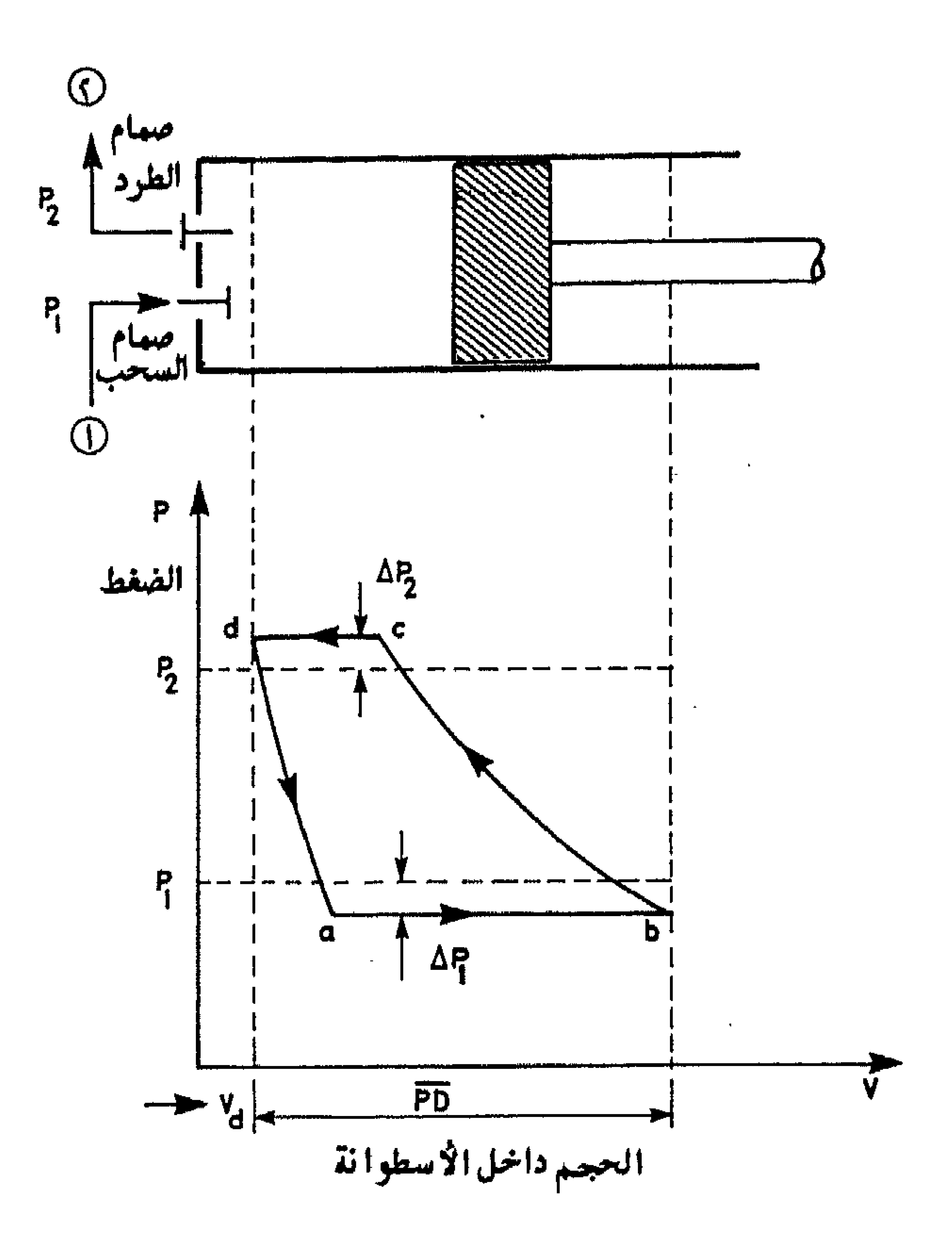
بينّا فيما سبق فكرة التشغيل الأساسية للضاغط الترددي ، وفي الجزء الحالي سنتعرض لهذه الفكرة بتفصيل أكبر . يبين شكل ٥.٤ العلاقة بين الضغط والحجم داخل أسطوانة الضاغط خلال مشواري السحب والطرد . وكما هو مبين بالرسم ، يبدأ مشوار السحب من النقطة d وينتهي بالنقطة b ماراً بالنقطة a . كذلك يبدأ مشوار الطرد بالنقطة b وينتهي بالنقطة d ماراً بالنقطة c . ويلاحظ من الرسم الآتي :

أ - ضرورة وجود حجم خلوص قدره V_d وهو الحجم المحصور داخل الأسطوانة عندما يصل الكباس إلى نهاية مشوار الطرد ، ولا يمكن عملياً تلاشي هذا الحجم حتى لا يلامس الكباس صفيحة الصمامات الموجودة برأس الأسطوانة .

ب - ضرورة وجود فقد ضغط قدره ΔP_1 في خط السحب عند دخول البخار إلى الضاغط كنتيجة لاحتكاك السريان مع صمام السحب .

جـ - ضرورة وجود فقد ضغط قدره ΔP_2 عند سريان البخار المضغوط من الأسطوانة إلى خط الطرد (خط الغاز الساخن) .

من شكل ٥.٤ تُعَرّف إزاحة الكباس النظرية ، بأنها الحجم الذي يزيحه الضاغط في



شكل ٥.٤ علاقة الضغط بالحجم داخل أسطوانة الضاغط الترددي .

وحدة الزمن . فإذا كان عدد الأسطوانات بالضاغط هو N_c وكانت سرعة دوران عمود إدارة الضاغط هي N لفة / دقيقة ، فإن حجم إزاحة الكباس عندئذ يكون كما يلي :

$$\overline{PD} = \frac{I}{60} \frac{\pi}{4} D^2 L N_c N \qquad (5.1)$$

حيث D و L هما قطر الكباس وطول المشوار على التوالي ، و I هي عدد الفعل للكباس ، وتأخذ I القيمة ١ أو ٢ إذا كان الضاغط فردي الفعل أو مزدوج الفعل على التوالي .

يلاحظ الآن أن إزاحة الكباس الفعلية تختلف عن القيمة السابقة حيث أن الحجم

المسحوب فعلياً للبخار يتم من النقطة a إلى النقطة b كما هو مبين بشكل ٥.٤ ، وتكون إزاحة الكباس الفعلية كما يلي :

$$\overline{PD} = V_b - V_a \tag{5.2}$$

وبفرض أن عملية السحب والطرد تتم تبعاً لعملية بوليتروبية ، أي أن

$$PV^n = C' \tag{5.3}$$

حيث C' ثابت وبالتالي تقدر قيمة $\overline{PD_a}$ كما يلي :

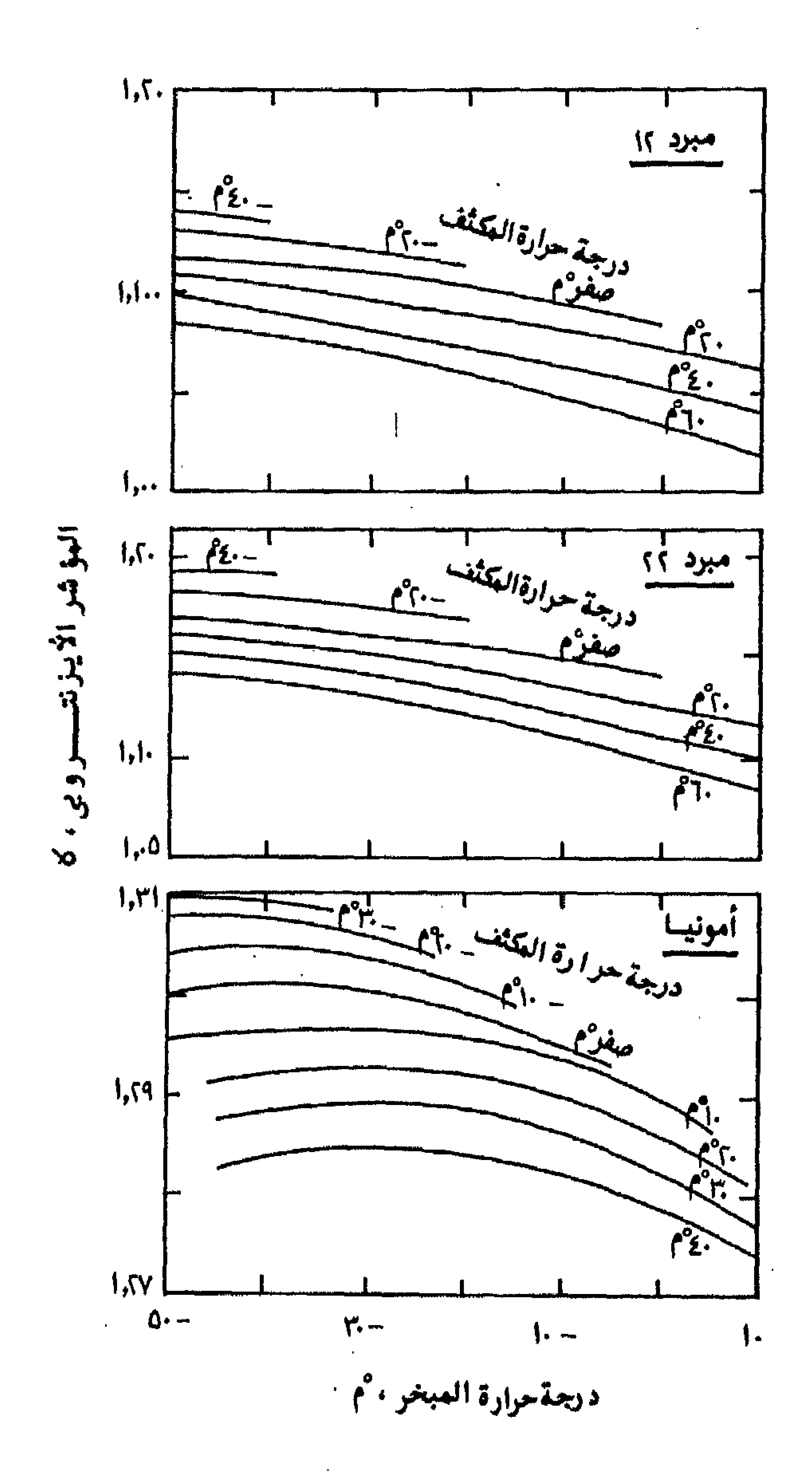
$$\overline{PD_a} = (\overline{PD} + V_d) - V_d (\frac{P_d}{P_a})^{1/n} \tag{5.4}$$

ومنها ينتج أن

$$\overline{PD_a} = \overline{PD} \left| 1 + C - C\, r_p^{1/n} \right| \tag{5.5}$$

حيث C هي نسبة حجم الخلوص V_d إلى إزاحة الكباس النظرية $\overline{PD}$ ، و r_p هي نسبة الانضغاط ، أي نسبة ضغط الطرد P_d إلى ضغط السحب P_a . وتعطي العلاقة السابقة القيمة الفعلية لإزاحة الكباس $\overline{PD_a}$ بدلالة قيمة إزاحة الكباس النظرية $\overline{PD}$.

أما إذا كانت عملية التمدد والانضغاط أيزنتروبية ، أي لم يكن هناك تبادل حراري بين البخار داخل الأسطوانة والمحيط به ، وكانت عمليتا التمدد والانضغاط انعكاسيتين (أي أهْمِلَ الاحتكاك) ، فإن قيمة المؤشر البوليتروبي n تصبح مساوية لقيمة المؤشر الأيزنتروبي γ (النسبة بين الحرارة النوعية عند ثبات الضغط إلى الحرارة النوعية عند ثبات الحجم) . وتعتمد قيمة γ على ضغط ودرجة حرارة المبرد المستخدم ، ويبين شكل ٥.٥ قيم γ المتوسطة عند مدى واسع لدرجتي حرارة المبخر والمكثف لمبرد ١٢ ومبرد ٢٢ والامونيا .



شكل ٥.٥ تغير قيمة المؤشر الأيزنتروبي لمبرد ١٢ ومبرد ٢٢ والأمونيا مع درجتي حرارة المبخر والمكثف [جوسني ، ١٩٨٢].

مثال ٥.١

يتكون ضاغط ترددي فردي الفعل من ٤ أسطوانات قطر كل منها الداخلي ٩٢ مم ،

وبطول مشوار قدره ٦٧ مم . إذا كانت سرعة دوران عمود إدارة الضاغط هي ١٤٥٠ لفة / دقيقة ، احسب إزاحة الكباس النظرية والفعلية إذا كان الضاغط يعمل بين درجتي حرارة تشبع بالمبخر والمكثف قدرهما -١٠° م و ٥٠° م على التوالي . افرض أن الانضغاط أيزنتروبي وأن الضاغط يستخدم مبرد ٢٢ ، وأن نسبة حجم الخلوص هي ٣٪ .

الحل

باستخدام معادلة ٥.١ تعطي إزاحة الكباس النظرية كما يلي :

$$\overline{PD} = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{4} \ (0.092)^2 \times 0.067 \times 4 \times 1450 = 0.043 \quad m^3/s$$

من ملحق أ لخواص مبرد ٢٢ نجد أن ضغط المبخر المناظر لدرجة حرارة -١٠° م هو ٣٥٤.٧ كيلوبسكال مطلق و ضغط المكثف المناظر لدرجة حرارة ٥٠° م هو ١٩٤٣.٢ كيلوبسكال مطلق ، وتكون نسبة الانضغاط r_p مساوية ٥.٤٨ . من شكل ٥.٥ ، نجد أن قيمة γ لمبرد ٢٢ هي ١.١٢ ، وتحسب إزاحة الكباس الفعلية من معادلة ٥.٥ كما يلي :

$$\overline{PD_a} = 0.043 \left\{ 1 + 0.03 - 0.03 \ (5.48)^{1/1.12} \right\} = 0.0384 \quad m^3/s$$

٥.٤ الكفاءة الحجمية

تعرف الكفاءة الحجمية للضاغط الترددي بأنها النسبة بين معدل الكتلة الذي قام الضاغط بمناولته إلى المعدل الظاهري للكتلة الذي يبدو أن الضاغط قام بمناولته ، أي أن* [ثريلكيلد ، ١٩٧٠]

$$\eta_V = \frac{\dot{m}}{\overline{PD} \ / \ v_1} = \frac{\overline{PD_a} \ / \ v_b}{\overline{PD} \ / \ v_1} \qquad (5.6)$$

* تعرف الكفاءة الحجمية في بعض المراجع بأنها نسبة الحجم الفعلي المزاح للمبرد إلى الحجم الظاهري المزاح بالضاغط ، وهو تعريف يختلف عن التعريف المعطى هنا.

حيث تم استبدال معدل سريان الكتلة بدلالة الإزاحة الفعلية للكباس والحجم النوعي V_b عند نهاية مشوار السحب داخل الأسطوانة ، حيث V_1 هي الحجم النوعي للبخار بخط السحب خارج الضاغط ، وبالتعويض بالمعادلة ٥.٥ تعطي قيمة الكفاءة الحجمية عندئذ كما يلي :

$$\eta_V = \frac{V_1}{V_b} \left(1 + C - C\, r_p^{1/n} \right) \tag{5.7}$$

ويلاحظ من العلاقة السابقة صفر قيمة η_V كلما ارتفعت نسبة الانضغاط للضاغط ، وتؤول الكفاءة الحجمية إلى الصفر إذا عمل الضاغط عن أقصى نسبة انضغاط له ، وهي

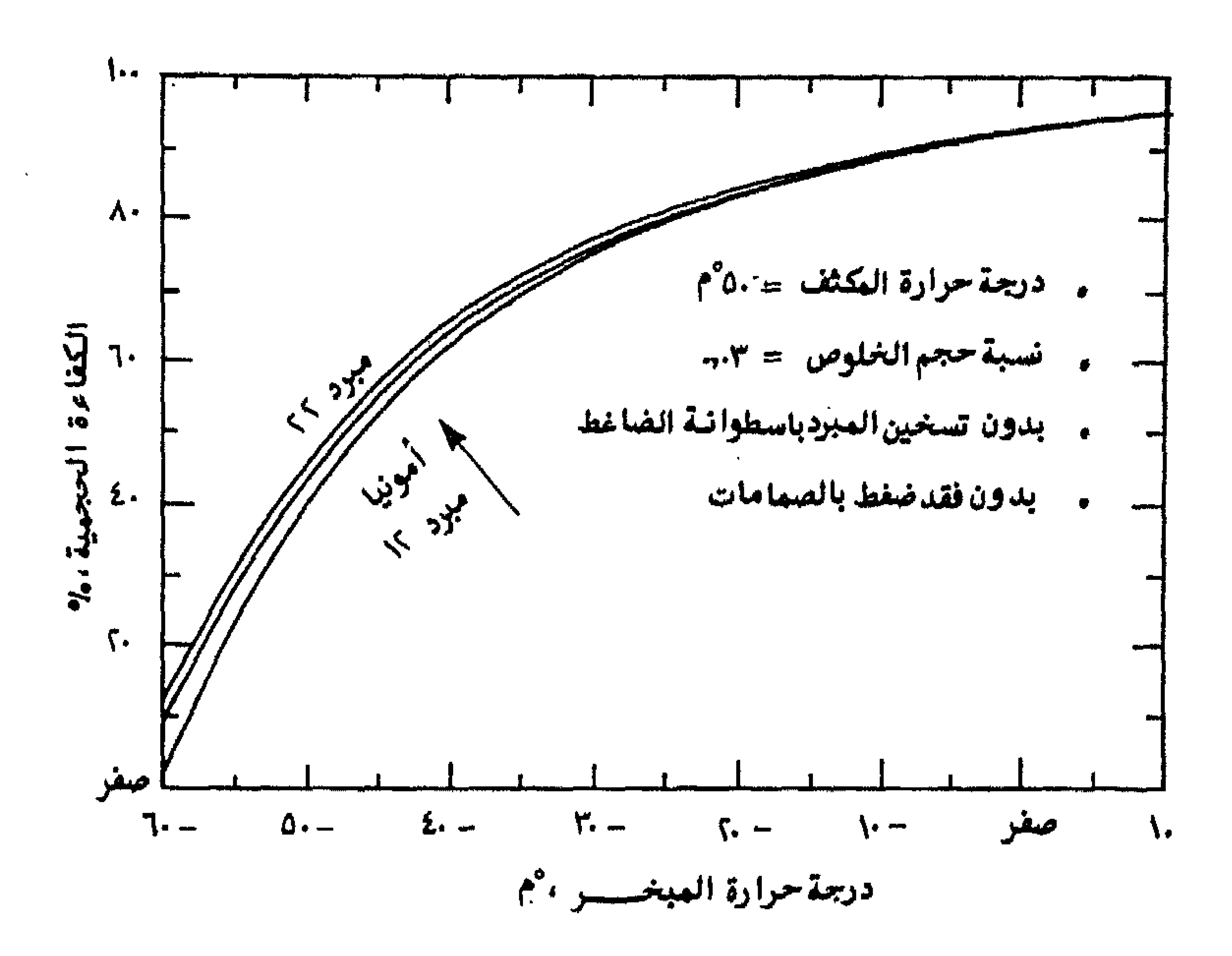
$$(r_p)_{max} = \left(1 + \frac{1}{C} \right)^n \tag{5.8}$$

لذا لا يفضل عادة استخدام الضواغط الترددية وحيدة المرحلة عند نسبة انضغاط مرتفعة ، حيث تكون الكفاءة الحجمية صغيرة نسبياً ، أو قد تتقارب من الصفر . ومن معادلة ٥.٧ يلاحظ اعتماد الكفاءة الحجمية للضاغط أيضاً على الحجمين النوعيين V_1 و V_b ، وتختلف قيمتا هذين الحجمين النوعيين عن بعضهما البعض نتيجة للآتي :

(أ) انخفاض الضغط عند نهاية مشوار السحب عنه خارج صمام السحب نتيجة احتكاك السريان خلال صمام السحب .

(ب) ارتفاع درجة الحرارة عند نهاية مشوار السحب عن درجة الحرارة خارج صمام السحب نتيجة تسخين السريان بأسطوانة الضاغط خلال مشوار السحب.

ويوضح شكل ٥.٦ تغير الكفاءة الحجمية لضاغط ترددي وحيد المرحلة مع درجة حرارة المبخر لمبرد ١٢ ، والأمونيا ، ومبرد ٢٢ وذلك بفرض تساوى قيمتي V_1 ، V_b ، ودرجة حرارة مكثف قدرها ٥٠ °م ، ونسبة خلوص C = ٠.٠٣ . هذا ، ولقد فرض أيضاً عند إعداد هذه العلاقة أن انضغاط المبرد تم بعملية أيزنتروبية .



شكل ٦ . ٥ تغير الكفاءة الحجمية للضواغط الترددية مع درجة حرارة المبخر لمبرد ١٢ ، والأمونيا ، ومبرد ٢٢ .

من معادلة ٦ . ٥ يعطى معدل سريان المبرد الذي يستطيع الضاغط مناولته كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1} \overline{PD} \; \eta_V \qquad (5.9)$$

ومن هذه العلاقة يتضح أيضاً الآتي

(أ) انخفاض معدل السريان $\dot{m}$ بانخفاض درجة حرارة المبخر نظراً لانخفاض η_V وكذلك نظراً لارتفاع قيمة الحجم النوعي v_1 بانخفاض ضغط المبخر .

(ب) انخفاض معدل السريان $\dot{m}$ بارتفاع ضغط المكثف ، وذلك كنتيجة لانخفاض قيمة η_V .

(جـ) انخفاض معدل السريان $\dot{m}$ بانخفاض قيمة $\overline{PD}$ نتيجة انخفاض واحد أو أكثر من المتغيرات الآتية : قطر أسطوانة الضاغط ، طول مشوار الكباس ،

عدد الأسطوانات بالضاغط ، سرعة دوران عمود إدارة الضاغط ، كما هو مبين بمعادلة ٥.١ .

مثال ٥.٣

في مثال ٥.١ احسب كفاءة الضاغط الحجمية ومعدل كتلة المبرد التي يناولها الضاغط . افرض أن بخار مبرد ٢٢ يخرج من الضاغط عند حالة التشبع ، و ١٠ كيلوبسكال فقد ضغط في صمام السحب وصمام الطرد ، و ٥° م تسخين في مشوار السحب بأسطوانة الضاغط .

الحل

من خريطة مبرد ٢٢ في ملحق أ نجد أن قيمة v_1 و v_b تعطى كما يلي

$$v_1 = 0.06513 \quad m^3/kg$$

$$v_b = 0.071 \quad m^3/kg$$

ومن نتائج مثال ٥.١ وباستخدام معادلة ٥.٧ ، تحسب الكفاءة الحجمية كما يلي

$$\eta_V = \frac{0.065}{0.071} \{ 1 + 0.03 - 0.03 \left(\frac{1943.2 + 10}{354.7 - 10} \right)^{1/1.12} \} = 0.814$$

ويحسب معدل الكتلة التي يناولها الضاغط من معادلة ٥.٩ بعد التعويض عن إزاحة الكباس النظرية من مثال ٥.١ ، وتكون النتيجة كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{0.065} \times 0.043 \times 0.814 = 0.54 \quad kg/s$$

٥.٥ القدرة اللازمة للانضغاط

يتم ضغط المبرد بالضاغط الترددي المثالي بعملية أيزنتروبية ، أي عملية أدياباتية

انعكاسية . عندئذ تعطي قدرة الانضغاط كما بينا سابقاً في الفصل الثاني كما يلي

$$\dot{W} = \dot{m} \ (h_1 - h_2) \tag{5.10}$$

حيث h_1 و h_2 هما إنثالبي المبرد قبل صمام السحب وبعد صمام الطرد بالضاغط على التوالي . أما عملياً ، فيحيد الضاغط عن الحالة المثالية السابقة نتيجة الآتي :

(أ) فقد ضغط المبرد عند سريانه خلال صمامي السحب والطرد.

(ب) تسخين المبرد خلال مروره فوق الموتور في حالة الضواغط محكمة أو نصف محكمة الغلق .

(جـ) تسخين المبرد بأسطوانة الضاغط أثناء مشوار السحب .

(د) انتقال الحرارة من المبرد إلي أسطوانة الضاغط أثناء مشوار الانضغاط ، نتيجة تبريد الأسطوانة بالهواء المحيط أو بالماء في بعض الحالات .

(هـ) الاحتكاك الناشئ عن السريان المضطرب للمبرد داخل أسطوانة الضاغط ، وكذلك احتكاك السريان مع جدار أسطوانة الضاغط .

ويلاحظ أن البند (هـ) عاليه يجعل عملية الانضغاط لانعكاسية ، أما البند (جـ) فيجعل عملية الانضغاط لاأدياباتية ، وينتج عن البنود (أ) و (ب) و (جـ) عاليه اختلاف حالة المبرد عند بداية ونهاية عملية الانضغاط عن الدورة المثالية ، حتى عندما لا يؤخذ التأثيران (د) و (هـ) في الاعتبار ، مما يزيد القدرة اللازمة لانضغاط المبرد .

وبفرض إهمال البند (هـ) عاليه ، يمكن القول إن انضغاط المبرد يتم بعملية بوليتروبية بدلاً من العملية الأيزنتروبية ، أي أن عملية الانضغاط تكون تبعاً للعلاقة

$$P\,V^n = C' \tag{5.11}$$

حيث C' هو ثابت العملية ، ويمكن تمثيل عملية الانضغاط بالضاغط الترددي كما هو مبين

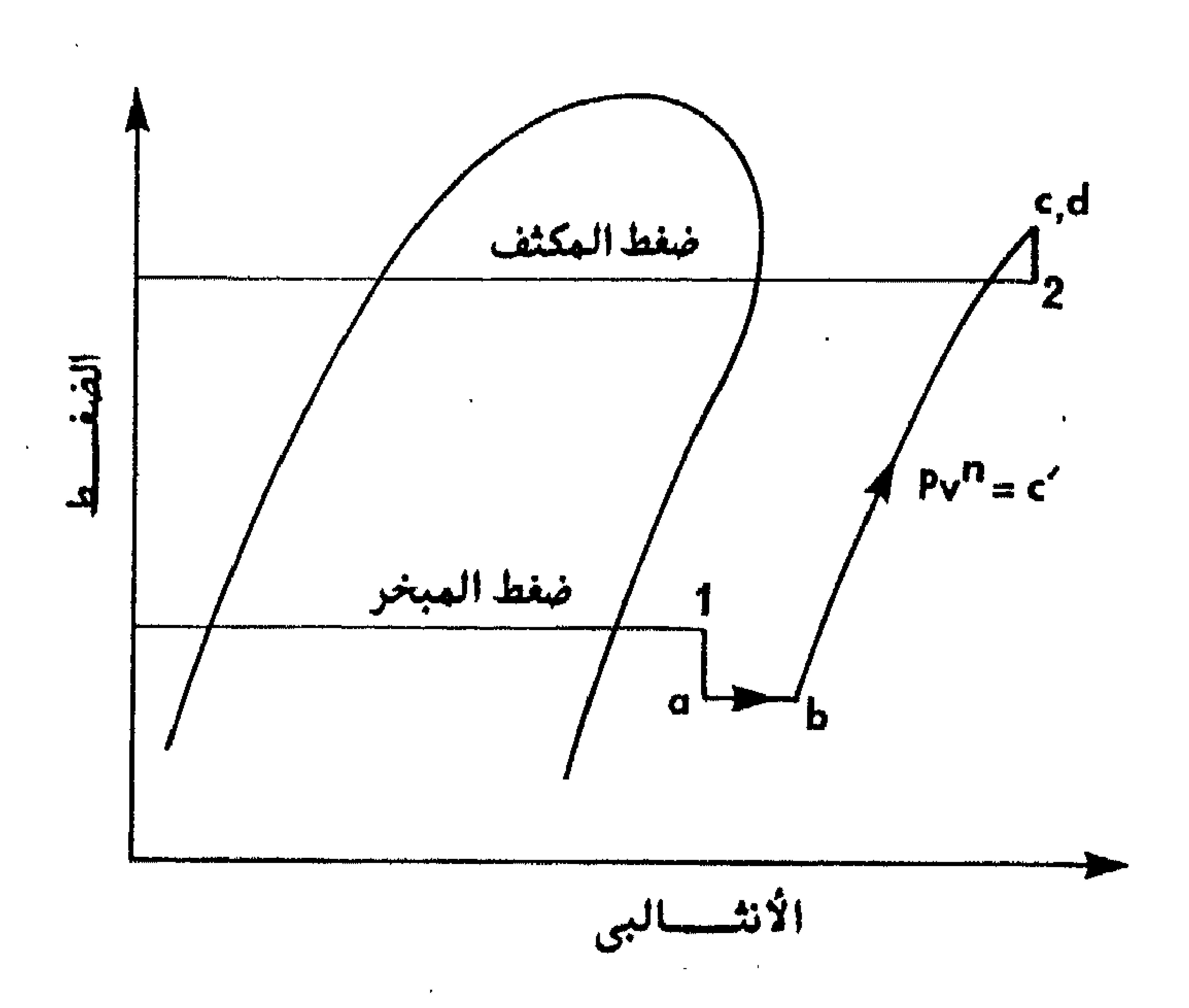
بشكل ٥.٧ حيث النقاط المبينة بالرسم تماثل النقاط المبينة بشكل ٥.٤ . وبفرض أن المبرد يمكن معاملته كغاز مثالي فإن القدرة اللازمة لانضغاط المبرد تعطى عندئذ كما يلي [السيد وآخرون ، ١٩٨٩] .

$$W = m \frac{n}{n-1} P_b v_b \left[r_p^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (5.12)$$

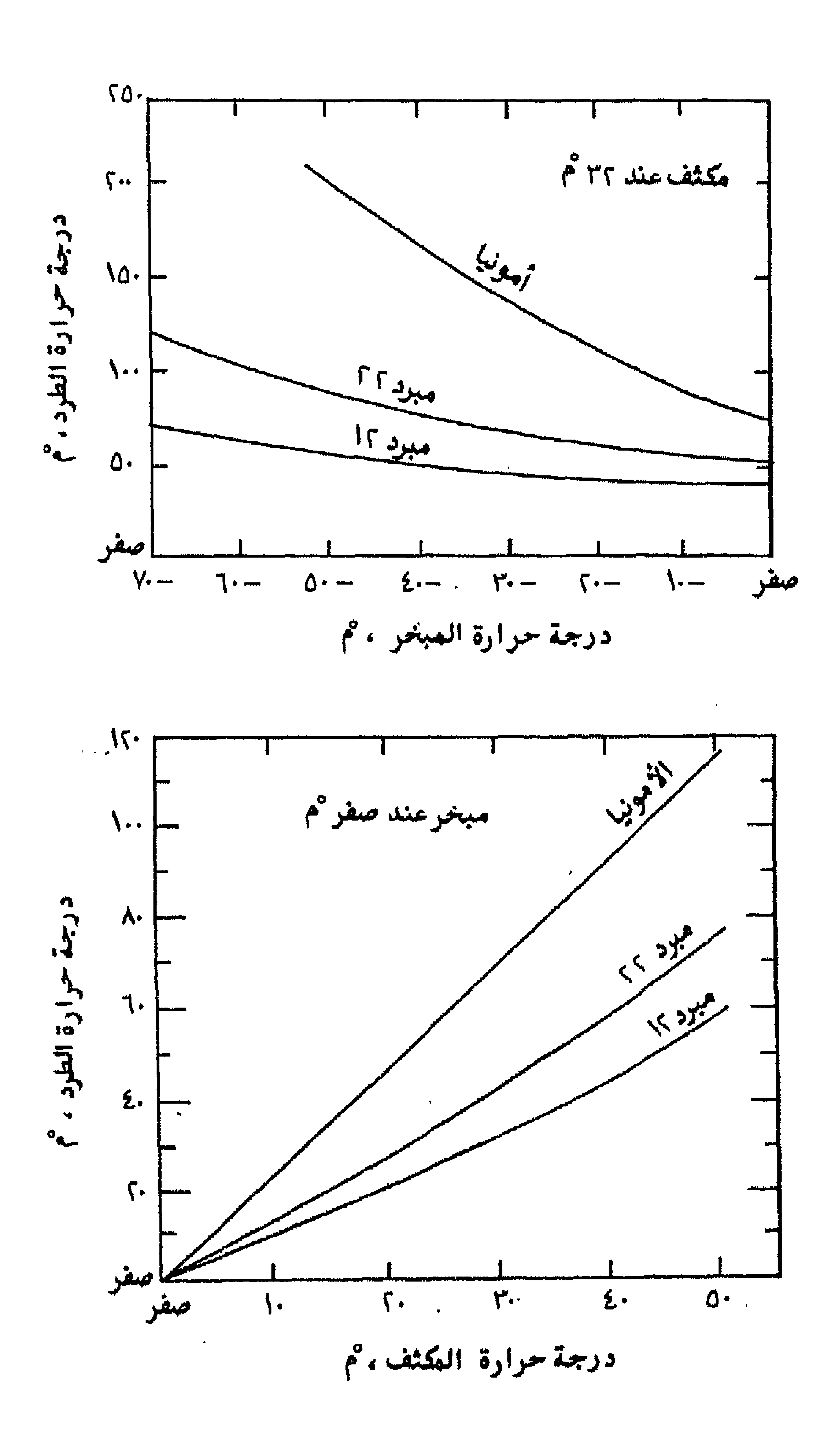
حيث r_p هي نسبة الانضغاط ، أي نسبة الضغط P_d إلى الضغط P_b . ويكون معدل تبريد أسطوانة الضاغط كما يلي

$$|\dot{Q}_r| = |\dot{W}| - (h_2 - h_1) \quad (5.13)$$

وتؤثر عملية تبريد المبرد أثناء الانضغاط على خفض القدرة اللازمة لانضغاط المبرد بمقدار ضئيل . إلا أن تبريد المبرد أثناء عملية الانضغاط قد يكون ضرورياً لمنع كربنة زيت التزييت وتكوين أحماض بارتفاع درجة حرارة الطرد [دوسات ، ١٩٨١] . وبمقارنة درجة



شكل ٥.٧ عملية انضغاط المبرد بضاغط ترددي ، أنظر أيضاً شكل ٥.٤ للتعرف على النقاط الموجودة بالخريطة.



شكل ٥.٨ تغير درجة حرارة الطرد من الضاغط مع درجة حرارة المبخر ودرجة حرارة المكثف لعدة مبردات .

حرارة الطرد من ضاغط مثالي (أي أن عملية الانضغاط أيزنتروبية) يعمل عند درجات حرارة تشبع مختلفة بالمبخر والمكثف ، يبين شكل ٥.٨ ضرورة تبريد ضواغط الأمونيا

دون ضواغط الهالوكربونات (مبرد ١٢ ومبرد ٢٢) حيث ترتفع درجة حرارة الطرد للأمونيا بالمقارنة بدرجة حرارة الطرد لمبردي ١٢ و ٢٢ . لهذا السبب لا تبرد ضواغط الهالوكربونات عادة ، أو بمعنى آخر يهمل مقدار التبريد الذي يتم للضاغط بالهواء الساكن المحيط ، وتكون قيمة المؤشر البوليتروبي n عندئذ قريبة من قيمة المؤشر الأيزنتروبي γ للمبرد . أما في حالة الأمونيا فيفضل استخدام الماء لتبريد أسطوانة الضاغط لخفض درجة حرارة الطرد بمقدار محسوس ، وتكون عندئذ قيمة n أقل من قيمة γ للأمونيا .

وتزيد القدرة اللازمة لانضغاط المبرد بحوالي ٧٪ عن القيمة المعطاه بالمعادلة ٥.١٢ إذا أخذ في الاعتبار البند (هـ) من أسباب حيود الضاغط عن الحالة المثالية والمقدم عاليه . وبأخذ الكفاءة الميكانيكية η_m للضاغط في الاعتبار والناتجة عند احتكاك الأجزاء الميكانيكية بالضاغط ، أي بين نقل الحركة من العمود الدوار إلى الكباس ، فإن القدرة اللازمة للضاغط من الموتور تعطى عندئذ كما يلي

$$\dot{W}_C = \frac{1.07}{\eta_m}\,\dot{W} \tag{5.14}$$

حيث تعطى $\dot{W}$ بالمعادلة ٥.١٢ .

مثال ٥.٣

في مثال ٥.٢ أحسب القدرة اللازمة لانضغاط مبرد ٢٢ في الضاغط ، ثم احسب القدرة التي يعطيها الموتور للضاغط بفرض كفاءه ميكانيكية قدرها ٨٩٪ .

الحل

بفرض انضغاط أيزنتروبي ، وباستخدام نتائج مثال ٥.٢ ومعادلة ٥.١٢ نجد أن

$$\dot{W} = 0.54 \times \frac{1.12}{1.12 - 1}\, 344.7 \times 10^3 \times 0.071 \; (5.67^{0.107} - 1) = 25.2 \;\; \text{kW}$$

ومن معادلة ٥.١٤ تكون القدرة اللازمة للضاغط من الموتور كما يلي

$$\dot{W}_C = \frac{1.07}{0.89} \times 25.2 = 30.3 \quad kW$$

٥.٦ أداء الضواغط الترددية

يعتمد أداء دورة التبريد إلى حد كبير على أداء الضاغط الذي هو أحد المكونات الأساسية لدورة التبريد ، فيعتمد معامل أداء الدورة على أداء الضاغط . ويقصد عادة بأداء الضاغط تغير معدل سريان كتلة المبرد خلال الضاغط ، والقدرة اللازمة لانضغاط المبرد مع تغير ظروف تشغيل الضاغط . ولقد فضل الكثير من مصنعي الضواغط استبدال معدل سريان الكتلة خلال الضاغط بسعة تبريد الضاغط التي تتناسب طردياً مع معدل سريان الكتلة . وبفرض أن الضاغط يعمل بدائرة تبريد مثالية كالمبينة على خريطة الضغط - الإنثالبي بشكل ٥.٩ فإن سعة تبريد الضاغط $\dot{Z}$ تعطى عندئذ كما يلي

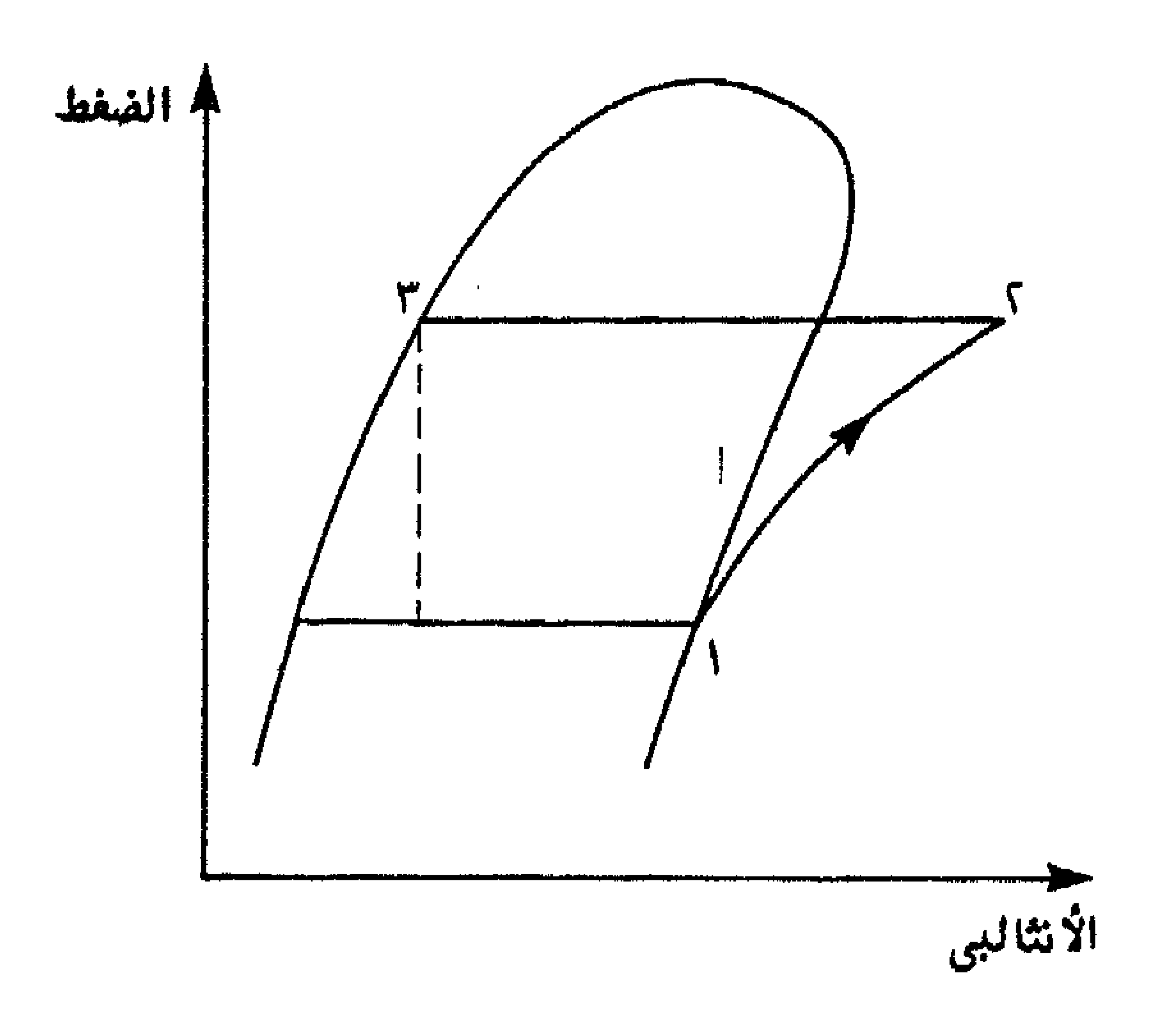
$$\dot{Z} = \dot{m}\ (h_1 - h_3) \tag{5.15}$$

وبالتعويض عن قيمة $\dot{m}$ بدلالة الكفاءة الحجمية من معادلتي ٥.٩ و ٥.٧ ، ينتج أن

$$\dot{Z} = \frac{1}{v_1}\ \overline{PD}\ \eta_v\ (h_1 - h_3)$$

$$= \frac{1}{v_b}\ \overline{PD}\ (1 + C - C\ r_p^{1/n})\,(h_1 - h_3) \tag{5.16}$$

أيضاً بالتعويض عن قيمة $\dot{m}$ كما سبق ، فإن قدرة الانضغاط بالضاغط تعطى من معادلة ٥.١٢ كما يلي



شكل ٥.٩ دورة تبريد بسيطة .

$$\dot{W} = \overline{PD} \; (1 + C - C \; r_p^{1/n}) \; \frac{n}{n-1} \; P_b \; [\, r_p^{(n-1)/n} - 1 \,] \qquad (5.17)$$

ويبين شكل ٥.١٠ تغير كل من سعة التبريد وقدرة الانضغاط لأحد الضواغط الترددية مع درجتي حرارة المبخر والمكثف لمبرد ٢٢ كما يمكن حسابهما من المعادلة ٥.١٦ و ٥.١٧ على التوالي . ويمثل الشكل حالة نمطية للمبردات الأخرى وباستخدام ضواغط أخرى ، وذلك من حيث اتجاه المنحنيات بالشكل ، دون القيمة العددية .

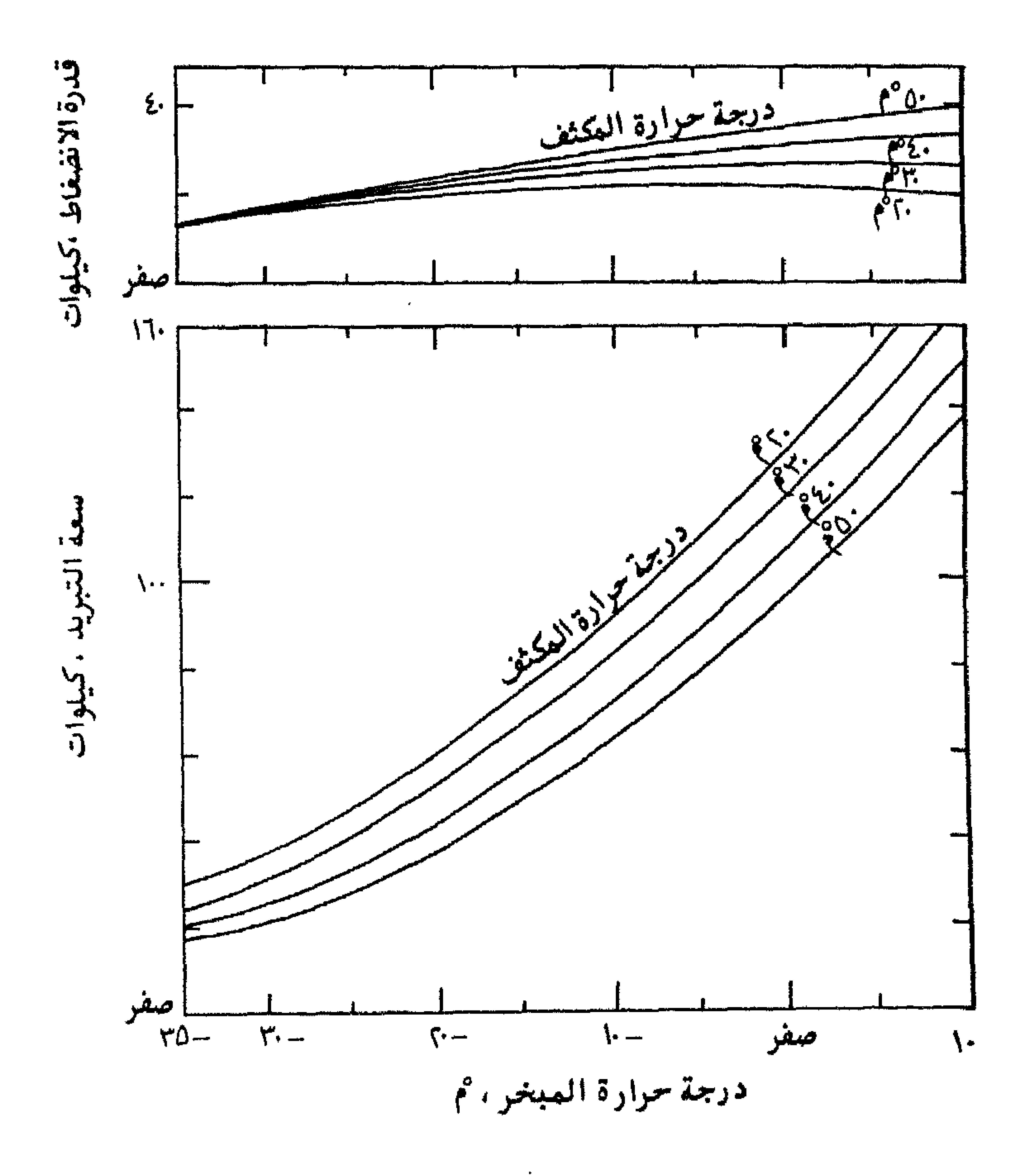
بمراجعة الشكل يمكن استنتاج الآتي عن أداء الضواغط الترددية :

١ - انخفاض سعة تبريد الضاغط بانخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) و/أو ارتفاع درجة حرارة المكثف (ضغط الطرد) .

٢ - انخفاض قدرة الضاغط بانخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف (ضغط الطرد) .

٣ - زيادة قدرة الانضغاط لكل وحدة سعة تبريد بانخفاض درجة حرارة المبخر و/أو ارتفاع درجة حرارة المبخر .

ونظراً للبند ٣ عاليه يفضل وجود تحكم لسعة تبريد الضاغط لتقليل قدرة الانضغاط لكل وحدة سعة تبريد عند انخفاض سعة التبريد بدورة التبريد ، وسيقدم هذا الموضوع بالتفصيل فيما بعد في جزء خاص بالفصل الحالي .



شكل ٥.١٠ تغير سعة التبريد وقدرة الانضغاط لأحد الضواغط مع درجتي حرارة التشبع بالمكثف والمبخر لمبرد ٢٢ [جوسني ، ١٩٨٢] .

مثال ٥.٤

في مثال ٥.١ إهمل فقد الضغط خلال صمامي السحب والطرد ، وكذلك إهمل تسخين مبرد ٢٢ بأسطوانة الضاغط خلال عملية السحب ، وافرض أن عملية الانضغاط أيزنتروبية ، احسب سعة تبريد الضاغط والقدرة اللازمة للانضغاط عند

أ) درجة حرارة مبخر = -١٠°م ودرجة حرارة مكثف = ٥٠°م

ب) درجة حرارة مبخر = صفر°م ودرجة حرارة مكثف = ٥٠°م

جـ) درجة حرارة مبخر = -١٠°م ودرجة حرارة مكثف = ٤٠°م

قارن النتائج التي تحصل عليها بالشكل العام لنتائج شكل ٥.١٠ .

الحل

من مثال ٥.١ نجد أن إزاحة الكباس النظرية = ٠.٠٠٤٢ م^٣/ث . ومن ملحق أ واستخدام الحالات ١ و ٢ و ٣ الموضحة بشكل ٥.٩ نجد أن

T_1 °م	T_3 °م	P_1 كيلوبسكال	P_3 كيلوبسكال	h_1 كيلوبسكال	h_3 كيلوبسكال	V_1 م^٣/ث
-١٠	٥٠	٣٥٤.٧	١٩٤٣.٢	٤٠٠.٨٣	٢٦٣.٠٢	٠.٠٠٦٥١٣
صفر	٥٠	٤٩٧.٩	١٩٤٣.٢	٤٠٤.٥٩	٢٦٣.٠٢	٠.٠٠٤٧٠٠
-١٠	٤٠	٣٥٤.٧	١٥٣٤.٠٠	٤٠٠.٨٣	٢٤٩.٤	٠.٠٠٦٥١٣

تحسب سعة التبريد من معادلة ٥.١٦ حيث قيمة C هي ٠.٠٣ من مثال ٥.١ وقيمة V_b تساوى قيمة V_1 لإهمال فقد الضغط في صمام السحب والتسخين بمشوار السحب . كذلك تحسب $\dot{W}$ من معادلة ٥.١٧ مع مراعاة أن P_b هى P_1 لنفس الأسباب السابقة . وتستخدم قيمة المؤشر الأيزنتروبي γ بدلاً من المؤشر البوليتروبي n حيث أن الانضغاط أيزنتروبي . وتقدر قيمة γ من شكل ٥.٥ . وفيما يلي ملخص الحسابات.

الحالة	T_1	T_3	γ	$\dot{Z}$	$\dot{W}$	$\dot{W} / \dot{Z}$
	°م	°م	-	كيلووات	كيلووات	كيلووات / كيلووات
أ	١٠-	٥٠	١,١٢	٨١,٢٥	٢٥,٤	٠,٣١
ب	صفر	٥٠	١,١٠	١٢٠,٠٠	٢٨,٨	٠,٢٤
جـ	١٠-	٤٠	١,١٢٥	٩١,٩٥	٢٢,٣٠	٠,٢٤

أى أن بارتفاع درجة حرارة المبخر تزيد سعة التبريد وتزيد القدرة اللازمة للانضغاط ولكن تنخفض القدرة اللازمة لكل وحدة سعة تبريد . أما بانخفاض درجة حرارة المكثف فإن سعة التبريد تزيد ولكن القدرة اللازمة للانضغاط تقل مما يعني انخفاض قدرة الانضغاط لكل وحدة سعة تبريد وتماثل هذه النتائج نفس الإتجاه العام للنتائج المعطاه بشكل ٥,١٠ .

٥.٧ التزييت

تحتاج الضواغط الترددية إلى تزييت مستمر أثناء تشغيلها . ويهدف هذا التزييت إلى تقليل الاحتكاك الناشئ عن تلامس الأسطح المتحركة مع بعضها البعض ، بالإضافة إلى إزالة الحرارة الناتجة عن هذا الاحتكاك . كما يهدف التزييت أيضاً إلى إزالة أي رواسب أو شوائب قد تعلق بالأجزاء المتحركة نتيجة لتآكلها . ويتم تزييت الضواغط الترددية إما بطريقة التزييت التناثري وإما بطريقة التزييت القسري . وفي الطريقة الأولي يوضع الزيت في حوض عمود الإدارة ، وبدوران عمود الإدارة يتناثر الزيت في جميع الاتجاهات فيلامس الأسطح المختلفة التي تحتاج إلى تزييت مثل أسطح أسطوانة الضاغط وكراسي التحميل (مَحَامِل) . وقد تركب مغارف بذارع التوصيل للمساعدة على حمل الزيت وتناثره على الأجزاء البعيدة عن مستوى سطح الزيت في الحوض . وتستخدم طريقة التزييت التناثري في الضواغط الصغيرة التي تحتاج إلى قدره تشغيل عادة أقل من ١٠

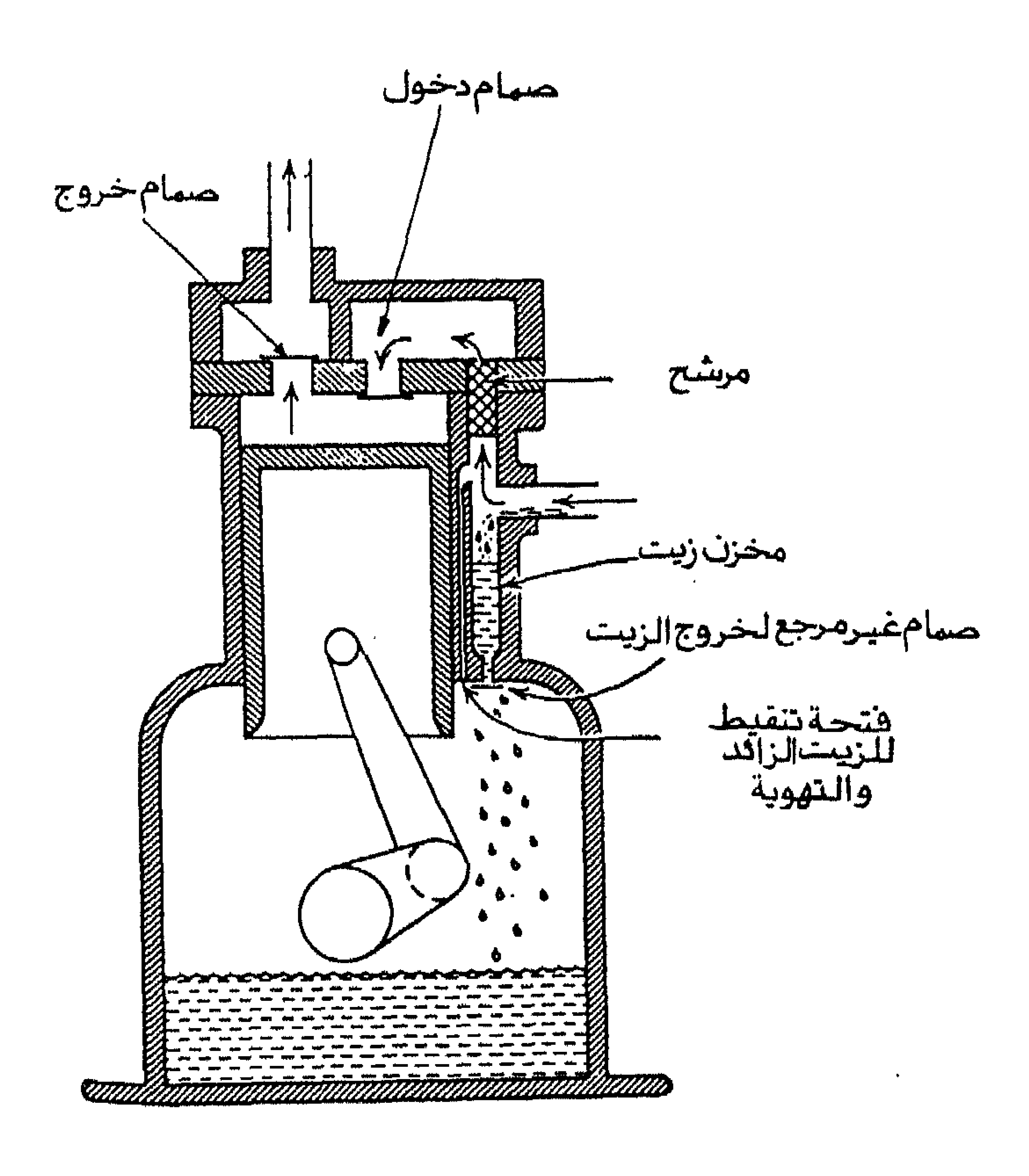
كيلووات . وتصاحب عملية التزييت بهذه الطريقة ضوضاء ، كما يلزم أن يكون سماح المَحَامِل كبير نسبياً لتسهيل دخول الزيت إلى المَحْمِل .

تستخدم طريقة التزييت القسري عادة بالضواغط التي تحتاج إلى قدرة تشغيل أكبر من ١٠ كيلووات . وفي هذه الطريقة تستخدم مضخة لتوزيع الزيت على الأسطح التي تحتاج إلى تزييت . ويلزم عندئذ وجود فتحات وممرات في جسم المكونات المختلفة للضاغط لمرور زيت التزييت إلى أسطح الاحتكاك . ويعود الزيت بعد تزييت الأسطح المختلفة إلي حوض الزيت حيث يسحب مرة أخرى بمضخة التزييت ، كما أن سماح المَحَامِل يجب أن يكون أقل نسبياً عنه في حالة التزييت التناثري . ويفضل عند التزييت القسري استخدام مصفي عند خط سحب المضخة لمنع دخول أي مواد غريبة قد تسبب انسداد ممرات التزييت مما يمنع عملية التزييت لبعض الأسطح . كذلك قد يفضل في بعض الأحيان تركيب مرشح عند خط طرد المضخة لمنع المواد الدقيقة الغريبة ، التي لم تتمكن المصفاه من حجزها ، من الدخول إلى ممرات التزييت والترسيب هناك مما يعوق عملية التزييت . وتستخدم بعض الضواغط طريقتي التزييت التناثري والتزييت القسري معاً لعملية التزييت للاستفادة من مميزات كل طريقة ولتحسين عملية التزييت .

ينتج عن تزييت جدار الأسطوانة ، لتقليل احتكاك الكباس بجدار الأسطوانة ، إختلاط جزء من زيت التزييت مع بخار المبرد والخروج معه من خط الطرد بالضاغط . لذا يلزم ضرورة إعادة هذا الزيت مرة أخرى إلي حوض عمود إدارة الضاغط حتى لا يتسبب عدم توفر الزيت الكافي للتزييت من تلف أسطح الاحتكاك بالضاغط . ويجب أن تصمم خطوط المبرد في الأجزاء المختلفة بدائرة التبريد للعمل على إعادة زيت التزييت المختلط بالمبرد إلى الضواغط مرة أخرى .

وتصمم معظم نظم الهالوكربونات بحيث يحمل المبرد زيت التزييت معه إلى خط

السحب حيث يعود هذا الزيت إلى حوض عمود إدارة الضاغط قبل دخول بخار المبرد إلى الضاغط . لهذا الغرض يلزم أن يتساوى الضغط في علبة عمود الإدارة مع ضغط خط السحب حتى يمكن للزيت السريان بسهولة إلى علبة عمود الإدارة . أما إذا زاد الضغط في هذه العلبة عن ضغط السحب فيصعب للزيت العودة إلى العلبة للاستخدام في عملية التزييت ، وإذا قل ضغط العلبة عن ضغط السحب ، فإن هذا الفرق في الضغط سيسبب سريان بخار المبرد مع الزيت إلى علبة عمود الإدارة ، مما يسبب العديد من المشاكل كما هو مبين في الجزء التالي من الفصل الحالي . لهذا السبب توضع فتحة تهوية تصل بين غرفة سحب الضاغط وعلبة عمود الإدارة لمساواة الضغط بينهما كما هو مبين بشكل ١١ . ٥ .



شكل ١١ . ٥ وصلة تهوية لتساوي ضغط السحب مع ضغط علبة عمود إدارة الضاغط

ويستخدم الزيت ، بالإضافة إلى عملية التزييت كمانع تسرب لبخار المبرد من خلال السماح الموجود بين الكباس والأسطوانة حيث يُكَوّن الزيت طبقة رقيقة (فيلم) تملأ تجويف هذا السماح وتمنع التسرب . لهذا السبب لا يمكن استخدام الزيوت المنخفضة اللزوجة في عملية التزييت بالرغم من أن انخاض اللزوجة يساعد على خفض القدرة اللازمة لانضغاط المبرد . ولتحديد أفضل لزوجة تصلح لتشغيل الضاغط ومنع التسرب في نفس الوقت ينصح عادة تجريب تشغيل الضاغط بزيت ما مرتفع اللزوجة وتقاس الكفاءة الحجمية للضاغط عندئذ وهي مقياس للتسرب ، ثم يعاد التشغيل مرة أخرى بزيت آخر أقل لزوجة نسبياً وتقارن الكفاءة الحجمية للضاغط بالقيمة السابقة ، وتستمر هذه التجارب حتى تبدأ الكفاءة الحجمية في الانخفاض فيكون هذا دلالة على تسرب المبرد خلال سماح الكباس والأسطوانة ، ومنها تحدد اللزوجة المثلي لزيت التزييت . وكقيمة تقريبية يمكن اختيار زيت التزييت لمبرد ١٢ ومبرد ٢٢ والأمونيا ، بلزوجة كينماتية تترواح بين ٣٢ إلى ٦٥ مم^{٢}/ث [أشراي ، ١٩٩٠] .

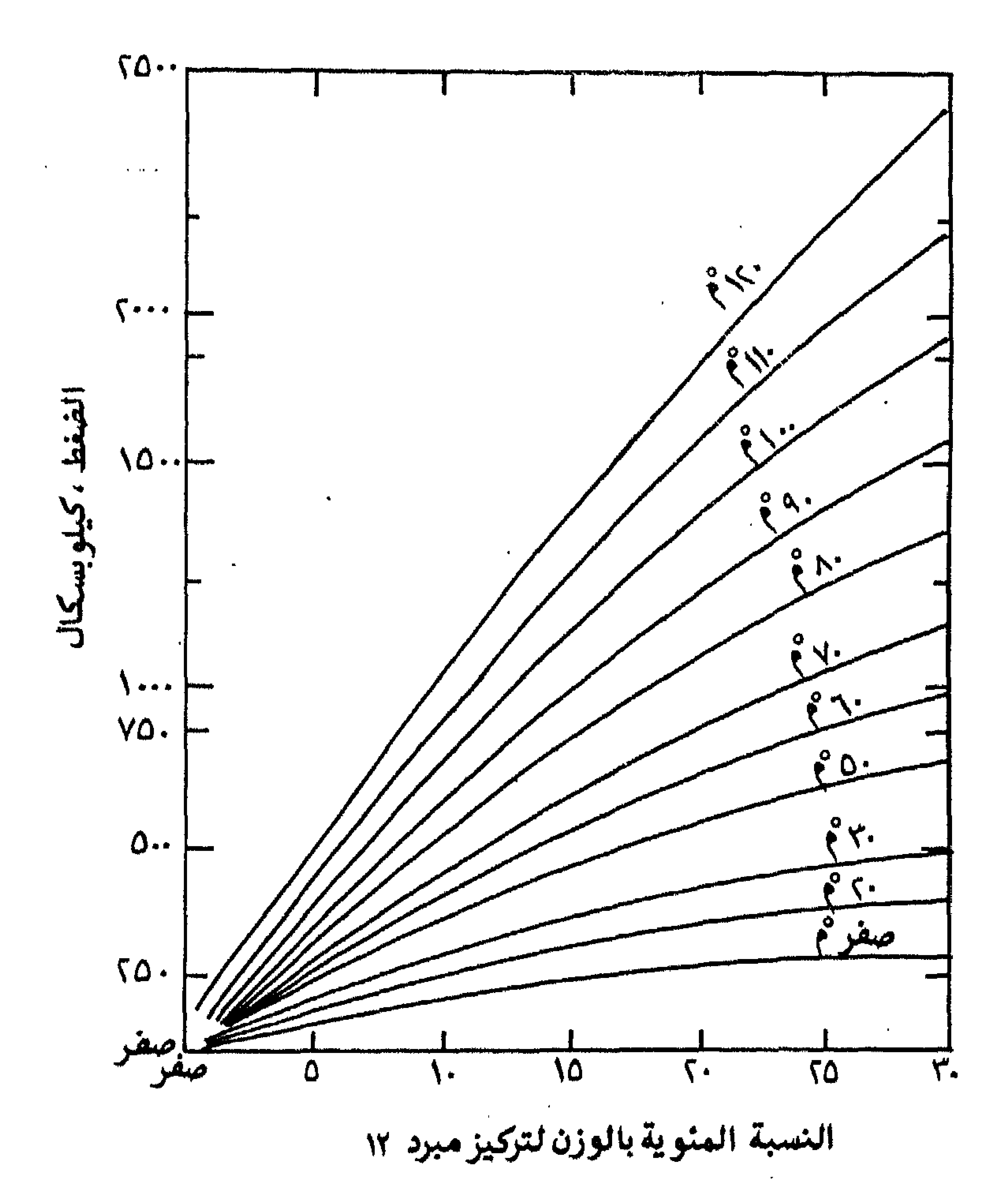
٥.٨ مشاكل وجود سائل المبرد بالضاغط

هناك احتمالان لوجود سائل المبرد في الضاغط هما أن يوجد هذا السائل في أسطوانة الضاغط أو أن يوجد في علبة عمود الإدارة مع زيت التزييت ، وكلا الاحتمالين غير مرغوب فيه ويسبب مشاكل عند تشغيل الضاغط .

يدخل سائل المبرد إلى أسطوانة الضاغط نتيجة ظاهرة ما يعرف باسم الطفح المرتد، أي دخول كميات من سائل المبرد بشكل مستمر إلى الضاغط . وتنتج ظاهرة الطفح المرتد عادة نتيجة خلل بأداء محبس التمدد ، أو نتيجة عدم جودة التحكم في سعة التبريد لنظام التبريد ، ولأسباب أخرى لا مجال هنا لذكرها . ويتسبب دخول سائل المبرد إلى

أسطوانة الضاغط في تكسير صمامات السحب والطرد بالضاغط ، وتكسير الكباس وذراع التوصيل في بعض الأحيان ، وذلك نتيجة توليد ضغط هائل بانضغاط السائل غير القابل للانضغاط . وهناك العديد من الحلول يمكن العمل بها معاً أو ببعض منها لمنع دخول سائل المبرد إلى أسطوانة الضاغط ، ومن هذه الحلول الآتي :

(أ) استخدام المقاس الصحيح لصمام التمدد بدائرة التبريد (وضبط مقدار فرق درجات التحميص الفوقي عند استخدام صمام تمدد ثرموستاتي) واستخدام طريقة جيدة وسريعة للتحكم في سعة التبريد .



شكل ١٢ . ٥ تغير ذوبانية مبرد ١٢ في أحد أنواع زيوت التزييت مع درجة الحرارة والضغط [أشراي ١٩٩٠] .

(ب) استخدام تحكم لضخ التفريغ حتى لا يتم تخزين أي سائل للمبرد بالمبخر مما قد يؤدي إلى طفح مرتد عند بداية التشغيل .

(جـ) استخدام مصيدة للسائل أو خزان تجميع لفصل أى قطرات لسائل المبرد من بخار التبريد الناتج من المبخر ، قبل الدخول إلى أسطوانة الضاغط .

وبالتصميم المتأني يمكن لمهندس التبريد منع أى سائل للمبرد من الدخول إلى أسطوانة الضاغط .

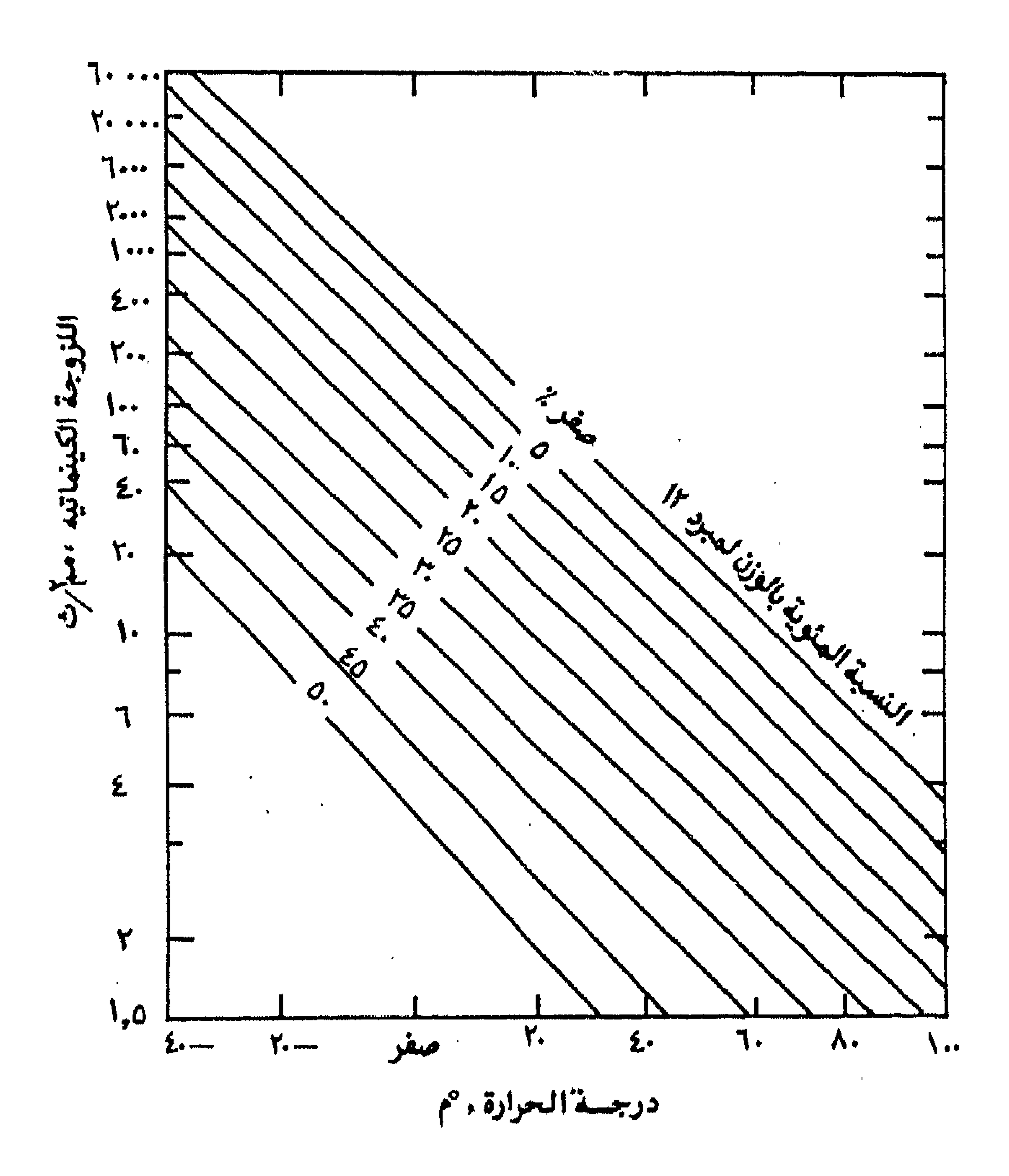
وهناك ثلاثة مصادر لدخول سائل المبرد إلى علبة عمود الإدارة ، هي : ذائباً في زيت التزييت ، ومنفصلاً عن الزيت ولكن عن طريق إنبوب عودة الزيت من خط السحب ، وكبخار مهاجر من خط السحب إلى علبة عمود الإدارة أثناء توقف الضاغط عن التشغيل . ويعتمد مقدار سائل المبرد في زيت التزييت على حد الذوبانية للمبرد في زيت التزيت المستخدم ، ودرجة حرارة زيت التزييت ، وضغط البخار للمبرد . وبدراسة مبرد معين مع زيت معين فإن الذوبانية تعتمد فقط على العاملين الآخرين . فبارتفاع درجة حرارة زيت التزييت تقل ذوبانية المبرد بالزيت ، وبانخفاض الضغط الجزئي للمبرد تنخفض الذوبانية إيضاً . كما هو موضح بشكل ١٢ . ٥ لذوبانية مبرد ١٢ في إحدى زيوت التزييت ، وهي مثال نمطي لزيوت التزييت عامة .

كما يمكن لسائل المبرد أيضاً الدخول إلى علبة عمود الإدارة عن طريق وصلة الزيت العائد من خط السحب إذا ما وجد سائل للمبرد عند طرف الوصلة (عادة إذا كان هناك طفح مرتد) . أما البخار المهاجر من خط السحب إلى علبة عمود الإدارة فيحدث أثناء توقف الضاغط . عندئذ يرتفع الضغط داخل علبة عمود الإدارة ، فتزيد ذوبانية بخار المبرد في الزيت الموجود بالعلبة ، فينخفض الضغط الجزئي لبخار المبرد فوق الزيت (انظر شكل ١٢ . ٥) . ونظراً لانخفاض هذا الضغط عن ضغط البخار في خط السحب والمبخر ، يهاجر

بخار المبرد خلال وصلة عودة الزيت إلى علبة عمود الإدارة حيث يمتص مرة أخرى بالزيت ، وهكذا .

ويسبب وجود سائل المبرد مخلوطاً بالزيت في علبة عمود الإدارة ثلاث مشاكل هي كالآتي :

(أ) انخفاض لزوجة الزيت كلما زادت نسبة المبرد (بالوزن) الذائب في الزيت. ويبين شكل ١٣ . ٥ تغير لزوجة أحد أنواع الزيوت مع النسبة المذابة من المبرد ودرجة



شكل ١٣ . ٥ تغير لزوجة أحد زيوت التزييت (نفس النوع المعطى بشكل ١٢ . ٥) مع درجة الحرارة لتركيزات مختلفة من مبرد ١٢ [أشراي ١٩٩٠] .

الحرارة . ويسبب انخفاض لزوجة الزيت احتمال كسر عزل الزيت خلال السماح بين الكباس والأسطوانة مما يؤدي إلى تسرب بخار المبرد من الأسطوانة ، وبالتالي انخفاض كفاءة الضاغط الحجمية .

(ب) حدوث إرغاء الزيت . فعند توقف الضاغط يهاجر بخار المبرد إلى علبة عمود الإدارة حيث يذوب بالزيت كما بينا ، وتزيد نسبة المبرد المذاب في الزيت بدرجة ملحوظة. وعند بدء تشغيل الضاغط ينخفض ضغط علبة عمود الإدارة فجأة مما يسبب غليان المبرد المذاب في الزيت وتبخيره بسرعة كبيرة مسبباً إرغاء الزيت. ويؤدي إرغاء الزيت إلى صعوبة عملية التزييت في حالة التزييت التناثري، وتوقف مضخة التزييت وعدم قدرتها على سحب الزيت في حالة التزييت القسري ، كما يؤدي دخول رغاوي الزيت إلى أسطوانة الضاغط إلى فقد جزء من حجم الأسطوانة المؤثر في عملية السحب مما يسبب انخفاض الكفاءة الحجمية للضاغط .

ولمنع إرغاء الزيت هناك عدة حلول هندسية لذلك يمكن الأخذ ببعضها أو جميعها . ومن هذه الحلول تركيب سخان بعلبة الزيت ، ويعمل هذا السخان فقط عند إيقاف الضاغط. وبتسخين الزيت وارتفاع درجة حرارته تقل قدرة المبرد على الذوبان في الزيت وبالتالي لا يهاجر بخار المبرد من خط السحب إلى علبة الزيت . كما ينصح أيضاً بتركيب صمام غير مرجع بين غرفة صمام خط السحب وعلبة عمود الإدارة كما هو مبين بشكل ٥.١١ . ويفيد هذا الصمام عند بدء التشغيل حيث ينخفض الضغط بغرفة صمام السحب فجأة فيمنع الصمام غير المرجع انخفاض ضغط علبة الزيت بسرعة ، وينخفض هذا الضغط تدريجياً وببطء نتيجة فتحة التهوية بين علبة الزيت وغرفة صمام السحب مما يمنع حدوث إرغاء الزيت . أيضاً لمنع تسريب سائل المبرد من خط السحب إلى علبة الزيت خلال وصلة عودة الزيت يجب الاهتمام بتصميم أجهزة التحكم ومواصفات محبس التمدد لمنع ظاهرة الطفح المرتد . كما يساعد نظام ضخ التفريغ على تفريغ المبخر عند إيقاف الضاغط مما يمنع هجرة

بخار المبرد من المبخر خلال خط السحب إلى علبة الزيت وبالتالي يمنع حدوث إرغاء الزيت عند بداية تشغيل الضاغط.

مثال ٥.٥

يستخدم نظام تبريد مبرد ١٢ وزيت تزييت له الخصائص المعطاه بشكلي ٥.١٢ و ٥.١٣ . يعمل النظام عند درجة حرارة تشبع قدرها -٢٠°م بالمبخر ، ويتم تزييت الضاغط بنظام تزييت قسري حيث تكون درجة حرارة الزيت في علبة إدارة الضاغط حوالي ٢٠°م عند التشغيل .

(أ) احسب ذوبانية مبرد ١٢ في الزيت داخل علبة عمود الإدارة أثناء تشغيل الضاغط .

(ب) احسب لزوجة الزيت الكينماتية أثناء التشغيل وتحقق من صلاحية هذا الزيت للتشغيل إذا كانت اللزوجة الموصى بها لتزييت الضاغط هي من ٣٢ إلى ٦٥ مم^2/ث.

(جـ) إذا وضع الضاغط في مكان حار نسبياً فارتفعت درجة حرارة الزيت بعلبة عمود الإدارة إلى ٤٠ °م أثناء التشغيل ، تحقق من صلاحية زيت التزييت عند هذه الظروف للتشغيل.

(د) عند التشغيل بزيت عند درجة حرارة ٢٠ °م ثم إيقاف الضاغط يرتفع الضغط داخل علبة خط السحب تدريجياً حتى يصل إلى ٥٦٠ كيلو بسكال بينما تنخفض درجة حرارة الزيت إلى ١٠ °م ، احسب درجة الحرارة المطلوب تسخين الزيت إليها باستخدام سخان كهربائي في علبة عمود الإدارة لمنع إرغاء الزيت عند بدء التشغيل.

الحل

من ملحق أ نجد أن ضغط المبخر المناظر لدرجة حرارة تشبع – ٢٠°م هو ١٥١ كيلوبسكال .

(أ) من شكل ٥.١٢ باستخدام ضغط قدره ١٥١ كيلوبسكال داخل علبة عمود الإدارة

ودرجة حرارة قدرها ٢٠ °م نجد أن ذوبانية مبرد ١٢ في الزيت تساوي ٧٪ .

(ب) من شكل ٥.١٣ نجد أن لزوجة الزيت تساوي ٤٥مم²/ث أي بين ٣٢ إلى ٦٥ مم²/ث ، وبالتالي يصلح الزيت للاستخدام عند ظروف التشغيل المعطاه .

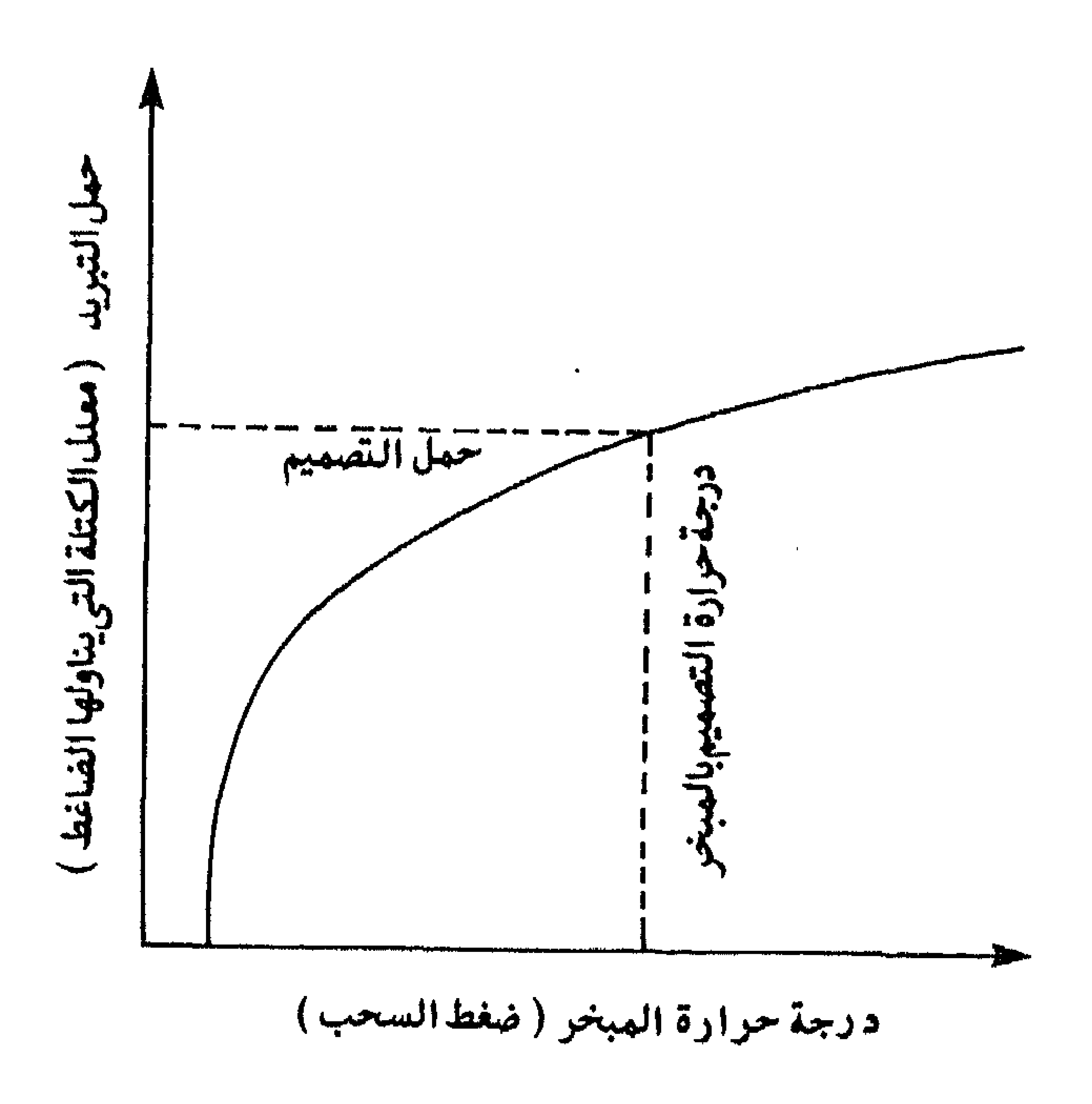
(جـ) من شكل ٥.١٢ تكون الذوبانية عند درجة حرارة قدرها ٤٠ °م وضغط قدره ١٥١ كيلوبسكال هي ٤٪ . من شكل ٥.١٣ نجد أن لزوجة الزيت تصبح ٢٠ مم²/ث أي أقل من ٣٢ مم²/ث وبالتالي لا يصلح الزيت للاستخدام .

(د) عند ضغط ٥٦٠ كيلوبسكال ودرجة حرارة ١٠ °م من شكل ٥.١٢ نجد أن الذوبانية ترتفع إلى أكثر من ٣٠٪ (غير موضح بالشكل) أي أكبر من ذوبانية التشغيل وقدرها ٧٪ ، أي أن إرغاء الزيت يحدث عند بدء التشغيل. وللمحافظة على ذوبانية قدرها ٧٪ نجد أنه يلزم تسخين الزيت إلى درجة حرارة قدرها ١٠٣ °م وهي درجة مرتفعه نسبياً ، وبفرض ذوبانية قدرها ١٠٪ (وهي لا تزيد كثيراً عن ٧٪) يلزم تسخين الزيت إلى ٨٠ °م فقط لمنع إرغاء الزيت عند بداية التشغيل .

٥.٩ التحكم في سعة تبريد الضاغط

هناك قلة من تطبيقات هندسة التبريد التي تختص بثبات حمل التبريد أثناء التشغيل ، أما معظم التطبيقات فيتغير حمل التبريد أثناء عملية التشغيل . ونظراً لارتباط أداء الضاغط بحمل التبريد بالمبخر حيث يعتمد هذا الأداء على : معدل البخر الناتج بالمبخر وضغط المبخر (أي ضغط سحب الضاغط) ، فإن ضغط سحب الضاغط ينخفض كلما انخفض حمل التبريد (أي انخفض معدل البخر الناتج بالمبخر) كما هو مبين بشكل ٥.١٤ . ويؤدي أداء الضاغط عند انخفاض حمل التبريد إلى الآتي :

(أ) انخفاض درجة حرارة المبخر إلى أقل من الصفر المئوي مما يسبب صقيعاً على ملفات المبخر في حالة تبريد الهواء ، أو تجمد الماء في حالة تبريد الماء ، مما يُضْعِفْ



شكل ١٤ . ٥ العلاقة بين ضغط السحب ومعدل سريان الكتلة التي يناولها ضاغط ترددي .

عملية انتقال الحرارة في الحالة الأولى ويسبب تلف المعدات في الحالة الثانية .

(ب) انخفاض معدل سريان المبرد بالمبخر فتنخفض سرعة المبرد داخل المبخر وفي المواسير المتجهة إلى الضاغط ما يعمل على ترسيب زيت التزييت على أسطح انتقال الحرارة بالمبخر وفي خطوط السحب للضاغط . ويؤدي هذا إلى ضعف عملية انتقال الحرارة بالمبخر وعدم وجود زيت كافي لعملية التزييت بالضاغط مما يؤدي إلى إتلافه أو قصر عمره .

(جـ) انخفاض ضغط السحب تبعاً لانخفاض معدل البخر بالمبخر ، فتزيد قدرة تشغيل الضاغط لكل وحدة من حمل التبريد ، مما يعني ارتفاع تكلفة التشغيل لكل وحدة حمل تبريد كلما قل حمل التبريد .

(د) في حالة استخدام الضواغط محكمة الغلق ، قد لا يكفي معدل سريان المبرد المناظر

لحمل التبريد من تبريد موتور الضاغط ، مما يسبب تسخين زائد للموتور وتلفه .

وللتغلب على جميع المشاكل السابقة أو جزء منها عند عمل الضاغط بحمل تبريد جزئ يلزم استخدام واحدة من الطرق المتاحة للتحكم في سعة تبريد الضاغط . وأهم هذه الطرق الآتي :

(أ) إيقاف وتشغيل الضاغط .

(ب) تغيير سرعة دوران عمود إدارة الضاغط .

(جـ) تحميل أو تفريغ أسطوانة أو أكثر من أسطوانات الضاغط .

(د) تجنيب الغاز الساخن الناتج من أسطوانة أو أكثر إلى خط السحب.

(هـ) تجنيب الغاز الساخن من الضاغط إلى دخول المبخر أو خط السحب .

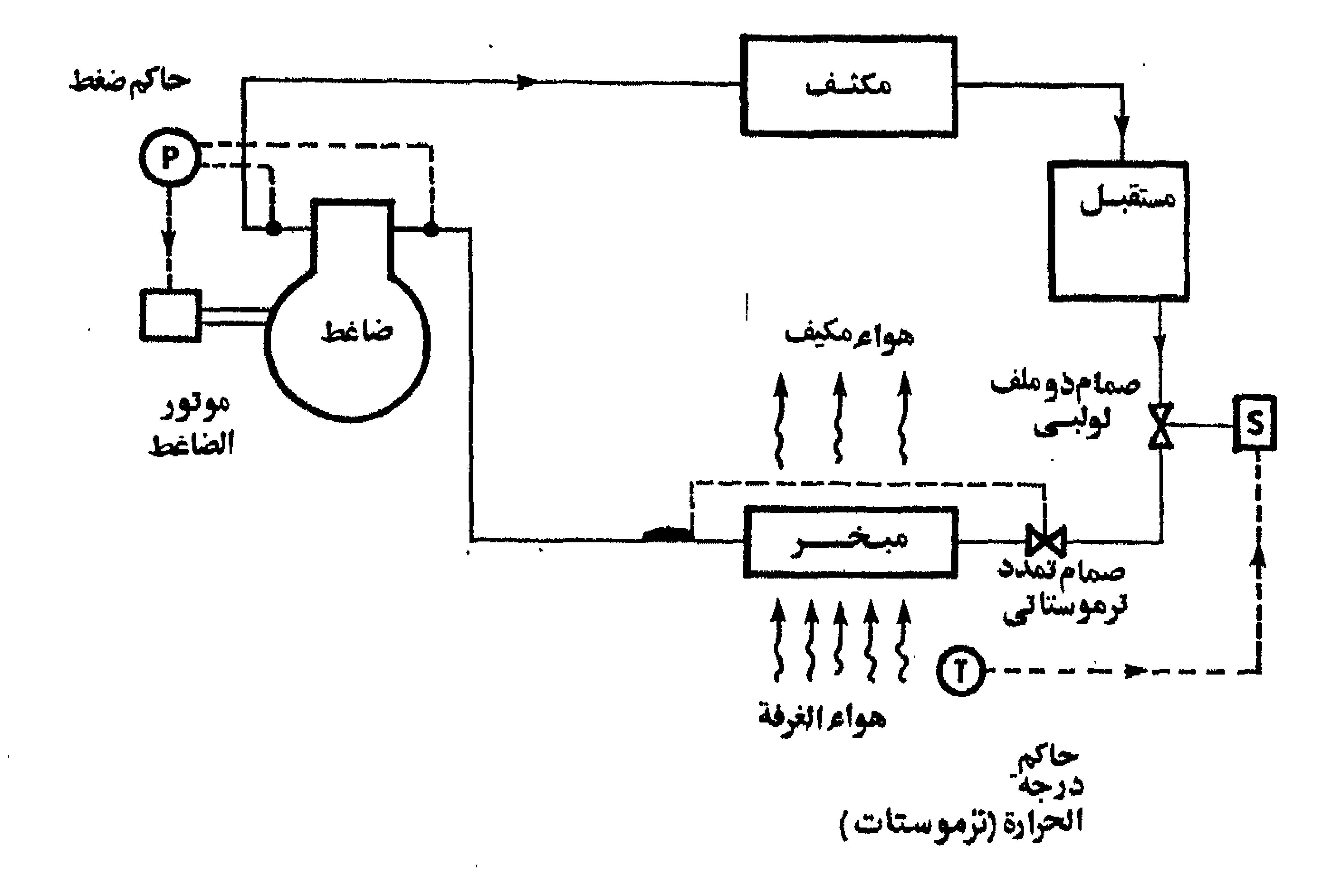
(و) استرجاع الطاقة باستخدام مكثف داخلي .

(ز) خنق ضغط خط السحب .

وفيما يلي مناقشة لهذه الطرق .

٥.٩.١ إيقاف وتشغيل الضاغط

في هذه الطريقة يستخدم حاكم درجة حرارة (ثرموستات) للتحكم في صمام ملف لولبي لإيقاف سريان المبرد إلى المبخر أو السماح به . فبإيقاف سريان المبرد في دائرة التبريد واستمرار تشغيل الضاغط ينخفض ضغط السحب عن حد السماح لضغط سحب الضاغط فيقوم حاكم الضغط المنخفض للضاغط بإيقاف موتور الضاغط فيتوقف الضاغط عن العمل . وبفتح صمام الملف اللولبي يرتفع ضغط خط السحب بالضاغط حتى إذا زاد عن حد السماح يعمل حاكم الضغط المنخفض على تشغيل موتور الضاغط . بهذه الطريقة يمكن للثرموستات إيقاف الضاغط إذا قلت درجة حرارة المبخر إلى الحد الذي قد يسبب تكوين صقيع على ملفات المبخر في حالة تبريد الهواء ، أو تجميد الماء في حالة تبريد الماء .



شكل ١٥ . ٥ التحكم في سعة التبريد بتشغيل وإيقاف الضاغط .

ونظراً لسهولة هذه الطريقة للتحكم في سعة تبريد الضاغط فإنها تستخدم في بعض التطبيقات التي بها ضواغط صغيرة نسبياً كوحدات تكييف الشباك . ويبين شكل ١٥ . ٥ مثالاً لاستخدام طريقة التشغيل والإيقاف للتحكم في سعة تبريد الضاغط .

كما تستخدم طريقة الإيقاف والتشغيل أيضاً بنجاح في نظم التبريد التي تستخدم أكثر من ضاغط على التوازي . في هذه الحالة يتم إيقاف الضواغط بالترتيب تبعاً لمقدار الخفض في حمل التبريد وعدد الضواغط المستخدمة . وتمتاز هذه الطريقة بتوفير طاقة تشغيل الضواغط بانخفاض حمل التبريد ، بالإضافة إلى انخفاض التكاليف اللازمة لتطبيق هذه الطريقة ، وتستخدم هذه الطريقة عادة في التطبيقات التي يستمر انخفاض حمل التبريد بها لفترات زمنية طويلة نسبياً ، ولا تصلح للاستخدام إذا كان تغير حمل

التبريد سريعاً حيث أن هذا يؤدي إلى تلف أو قصر عمر الموتور والضاغط نتيجة التحميل الزائد المتتالي عند بداية كل تشغيل ، وكذا التسخين الزائد للموتور . كما تستخدم هذه الطريقة أيضاً كوسيلة لخفض عزم البداية لتشغيل الضواغط بأن تبدأ هذه الضواغط التشغيل بترتيب معين بدلاً من أن تبدأ معاً .

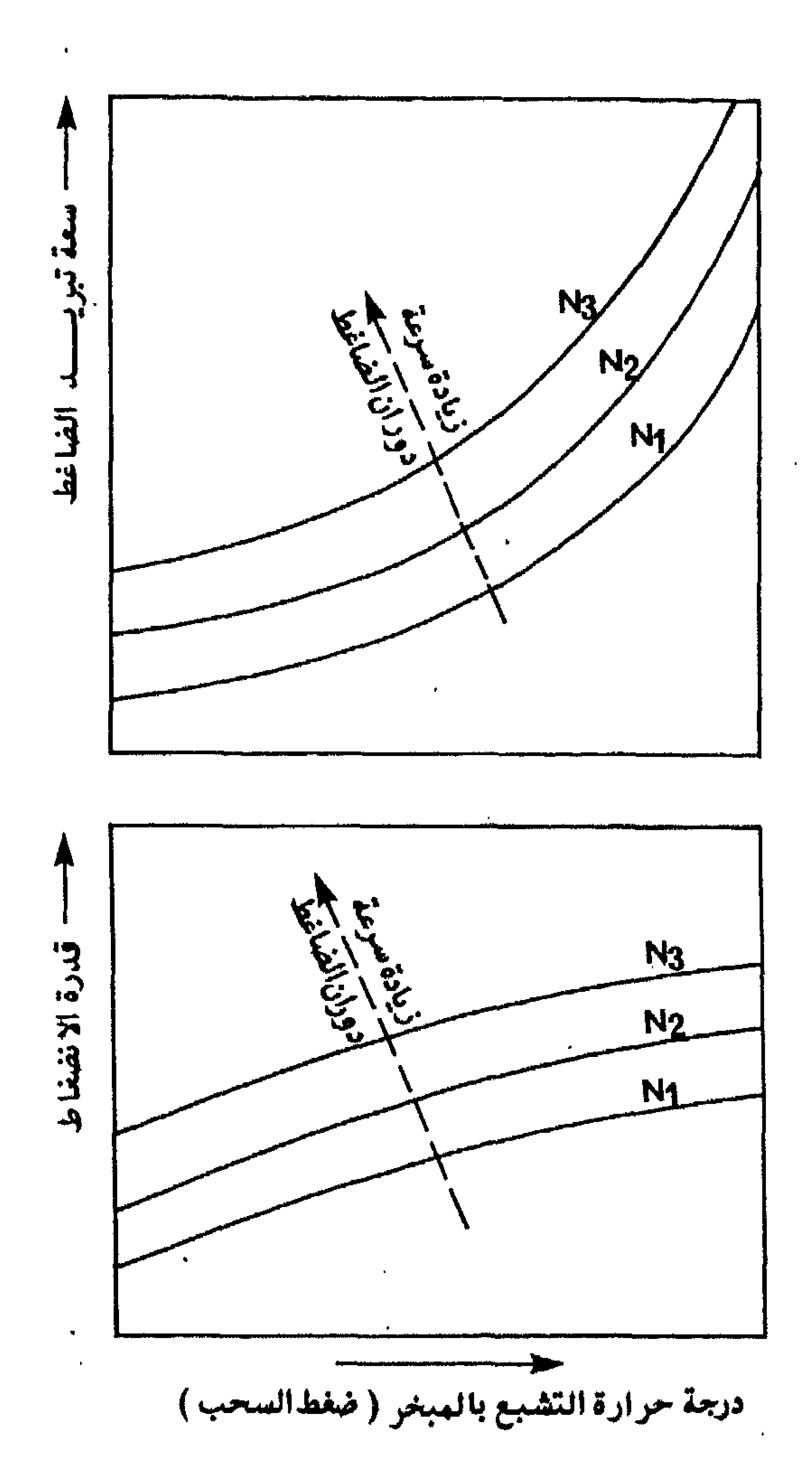
٥.٩.٢ تغيير سرعة دوران عمود إدارة الضاغط

بينا في الجزء ٥.٦ أن سعة تبريد الضاغط تعتمد على إزاحة الضاغط النظرية كما هو معطى بالمعادلة ٥.١٦ ، فبزيادة سرعة دوران الضاغط تزيد إزاحة الضاغط ، وبالتالي تزيد سعة التبريد بنفس معدل زيادة سرعة الدوران . وتبين معادلة ٥.١٧ تغير قدرة الانضغاط مع سرعة دوران الضاغط ، وهي تعتمد أيضاً على إزاحة الضاغط التي تعتمد بدورها على سرعة دوران الضاغط . وبتثبيت درجة حرارة المكثف يمكن إستنباط شكل ٥.١٦ من شكل ٥.١٠ عند استخدام عدة سرعات لدوران الضاغط . ويتضح من الشكل إمكانية تغير سعة التبريد بتغير سرعة دوران الضاغط مع بقاء درجة حرارة المبخر ثابتة . وتمتاز هذه الطريقة للتحكم في سعة تبريد الضاغط بالآتي :

(أ) انخفاض القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط بانخفاض سعة تبريد الضاغط (توفير طاقة) .

(ب) إمكانية ثبات ضغط السحب ، أو عدم انخفاضه عن حد معين بانخفاض حمل التبريد (حماية من الصقيع والتجمد بانخفاض حمل التبريد) .

إلا أن أهم عيوب هذه الطريقة ارتفاع تكلفة الموتورات متغيرة السرعة بالمقارنة بالموتورات ثابتة السرعة ، أو ذات السرعتين ، ونظراً لهذا العيب فإن هذه الطريقة لم تكن تستخدم بكثرة في تطبيقات التبريد المختلفة ، ولكن نظراً للتقدم في صناعة الإلكترونيات أمكن التحكم في سرعة الموتورات وانتشر حديثاً استخدام الموتورات متغيرة السرعة في



شكل ٥.١٦ العلاقة بين سعة التبريد وقدرة الانضغاط لضاغط ترددي مع ضغط السحب وسرعة دوران الضاغط.

التحكم في سعة تبريد الضاغط .

مثال ٥.٦

في مثال ٥.١ إهمل فقد الضغط في صمامي السحب والطرد ، وكذلك إهمل

التسخين خلال مشوار السحب . إذا انخفض حمل التبريد إلى ٥٠٪ من قيمة التصميم ، احسب سرعة دوران عمود إدارة الضاغط للمحافظة على درجة حرارة المبخر ثابتة . كذلك احسب الوفر في قدرة الانضغاط عند هذه الظروف .

الحل

من مثال ١ . ٥ نجد أن

$$\overline{PD} = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{4} \; (0.092)^2 \times 0.067 \times 4 \times N = 2.97 \; N$$

من معادلة ١٦ . ٥ عند ثبات درجة حرارة المبخر ، أي ثبات ضغط السحب ، تكون النسبة بين سعة تبريد الضاغط $\dot{Z}_2$ إلى سعة تبريد التصميم $\dot{Z}_1$ كما يلي

$$\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

وتكون سرعة دوران الضاغط عندئذ كما يلي

$$N_2 = 0.50 \times 1450 = 725 \quad \text{rpm}$$

ومن معادلة ١٧ . ٥ تكون نسبة قدرة التشغيل عند ٥٠٪ من سعة تبريد التصميم إلى قيمتها عند نقطة التصميم كما يلي

$$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \frac{N_2}{N_1} = 0.5$$

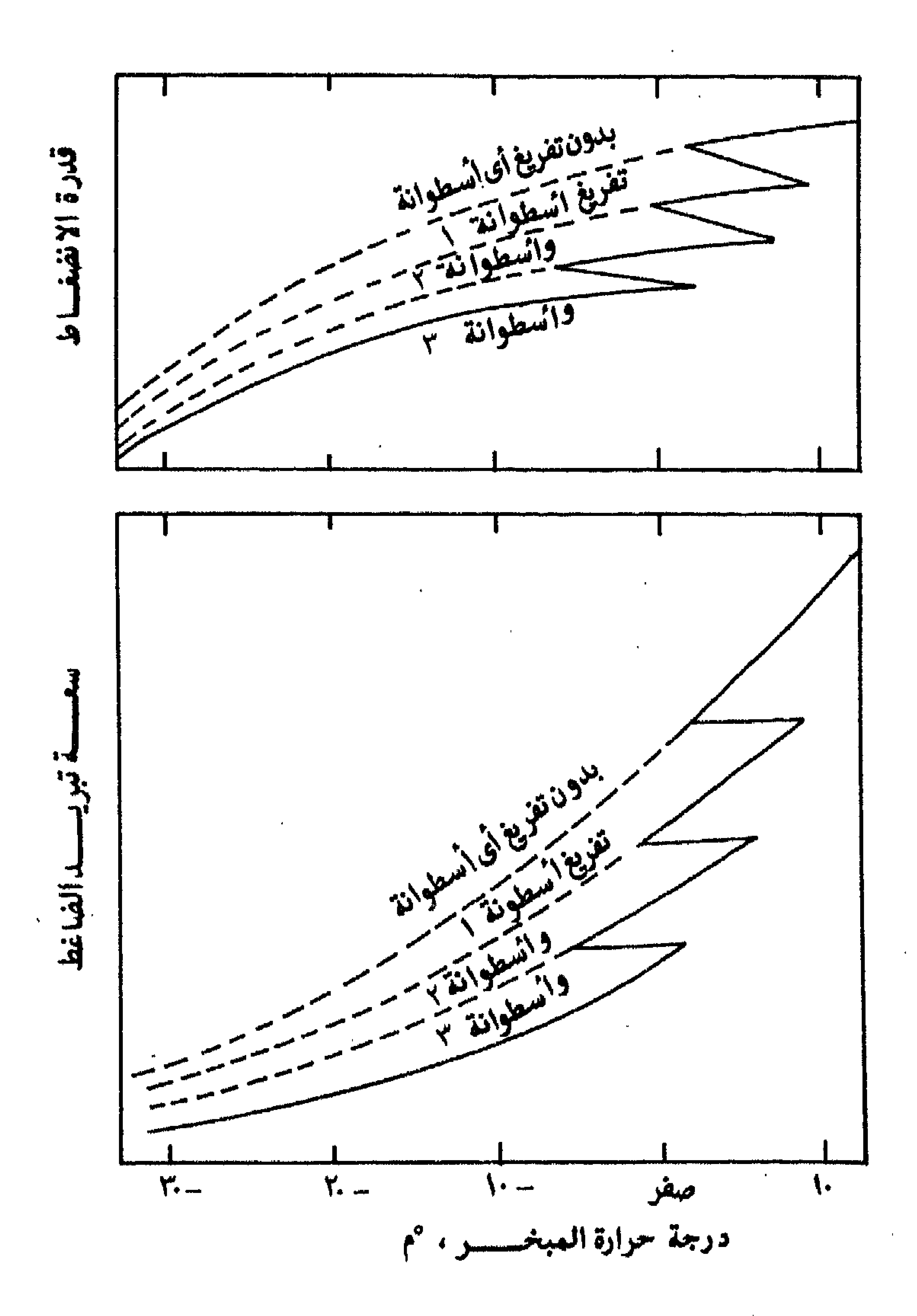
أي أنه تم توفير ٥٠٪ من قدرة الانضغاط . لاحظ الآن الآتي :

(١) القيم المعطاه في المثال السابق تفترض ثبات ضغط السحب ، أما إذا تغير هذا الضغط فيجب أخذه في الاعتبار تبعاً للمعادلتين ١٦ . ٥ ، ١٧ . ٥ .

(٢) تم افتراض ثبات الكفاءة الميكانيكية للضاغط مع سرعة الدوران وهذا غير صحيح ، كذلك أُفْتُرِضَ ثبات الاحتكاك الناشئ عن سرعة السريان المضطرب للمبرد داخل أسطوانة الضاغط ، فإذا أُخِذَ هذان العاملان في الاعتبار كانت نسبة $\dot{W}_2$ إلى $\dot{W}_1$ أكبر من ٥ . ٠ .

٥.٩.٣ تحميل وتفريغ أسطوانة أو أكثر بالضاغط

في هذه الطريقة تفرغ أسطوانة أو أكثر من أسطوانات الضاغط من الحمل ، مما يعمل على تغير العلاقة بين سعة تبريد الضاغط وضغط السحب له . ويبين شكل ٥.١٧ هذه



شكل ٥.١٧ تغير حمل التبريد وقدرة تشغيل الضاغط مع درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) لضاغط بدون استخدام ومع استخدام تحكم سعة تبريد بطريقة تفريغ أسطوانة أو أكثر .

العلاقة عند تفريغ أسطوانة ، ثم أسطوانتين ، فثلاث أسطوانات للضاغط بالمقارنة مع نفس العلاقة بدون تفريغ أي أسطوانات بالضاغط . أيضاً يبين نفس الشكل تغير القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط مع ضغط خط السحب للضاغط مع تفريغ من أسطوانة إلى ثلاث أسطوانات ، وبدون تفريغ أي من الأسطوانات . ويوضح الشكل انخفاض قدرة تشغيل الضاغط لكل وحدة من حمل التبريد ، باستخدام طريقة تفريغ أسطوانة أو أكثر بالمقارنة بتشغيل الضاغط محملاً وبدون تفريغ أي من أسطواناته ، أي أن الطريقة الحالية للتحكم في سعة الضاغط تقلل من استهلاك الطاقة بالتشغيل عند حمل تبريد جزئي .

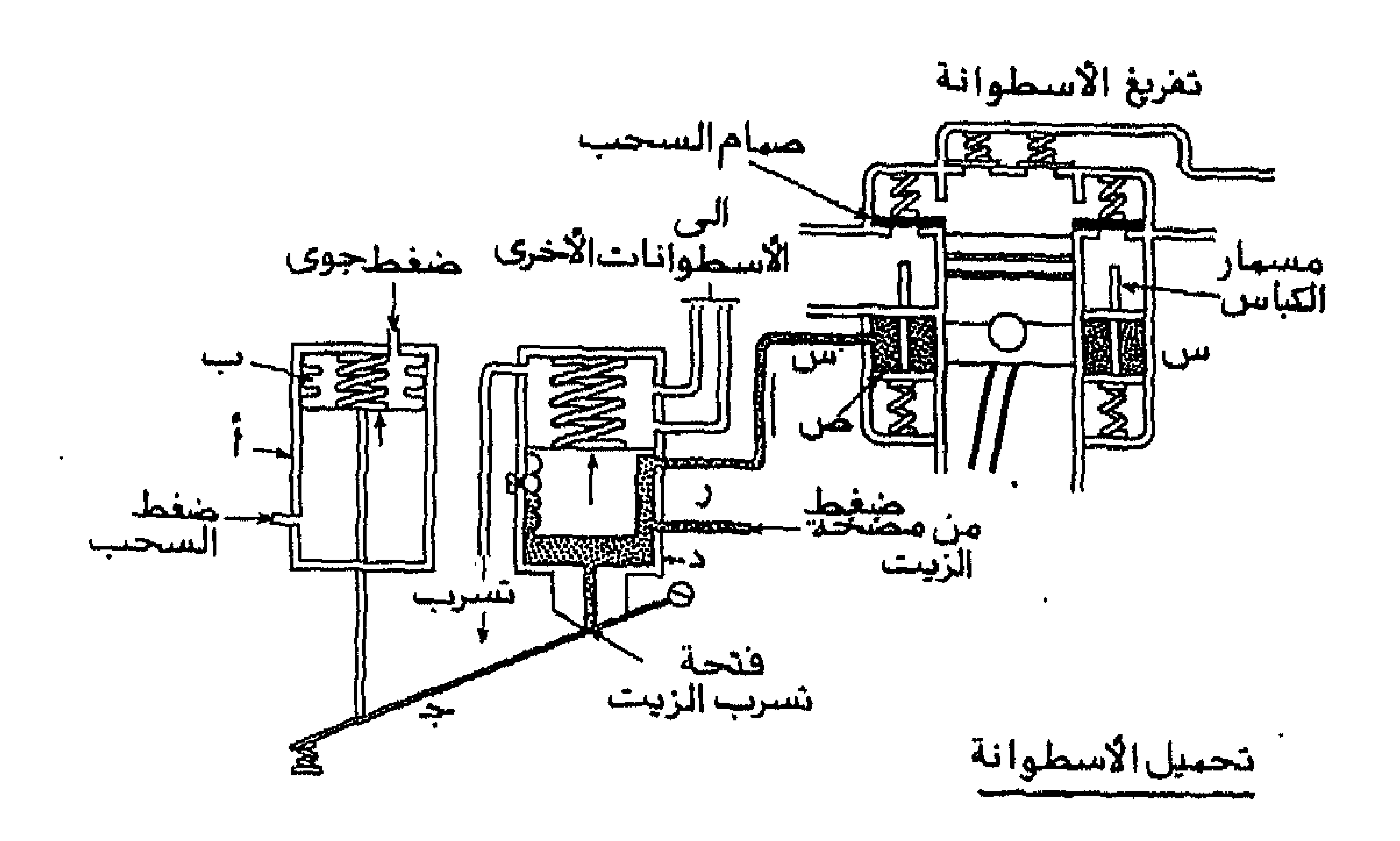
وهناك عدة طرق في تقنية تحميل وتفريغ أسطوانة أو أكثر بالضاغط تبعاً لحمل التبريد ، إلا أن أهم هذه الطرق يمكن تقسيمها ، تبعاً لعمل النظام الميكانيكي الذي يقوم بهذه المهمة ، إلى قسمين أساسيين :

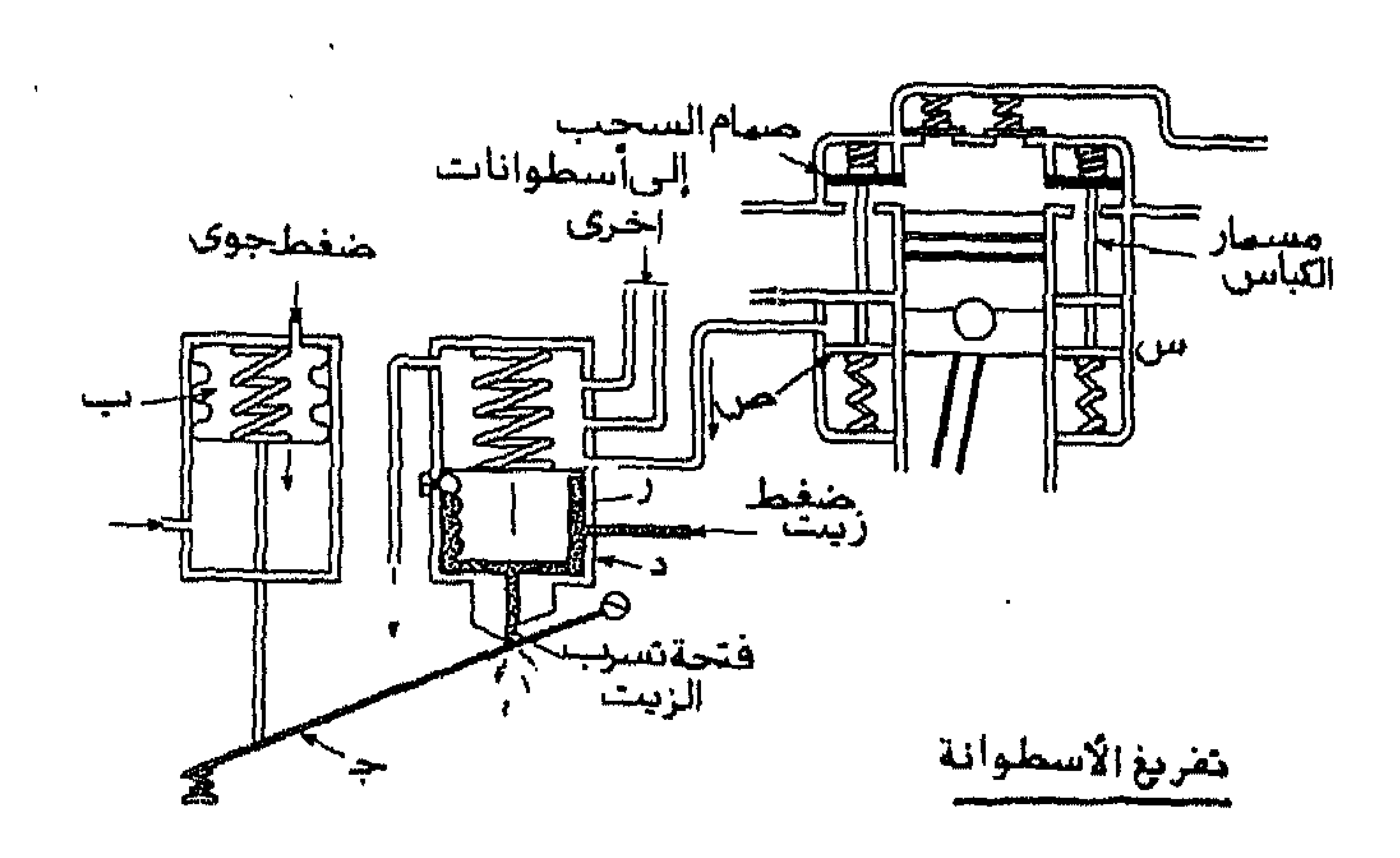
أ) نظام يعمل بضغط خط السحب

ب) نظام يعمل بدرجة حرارة حمل التبريد .

وتعتمد هاتان الطريقتان على تصميم نظام ميكانيكي لحفظ صمام سحب الأسطوانة مفتوحاً مما يؤدي إلى تفريغ (عدم تحميل) الأسطوانة ، أي لا يقوم الكباس بهذه الأسطوانة بإجراء أي شغل لضغط المبرد .

يوضح شكل ٥.١٨ نظام تفريغ أسطوانة أو أكثر بالضاغط ، يعمل بضغط خط السحب. يُوَصَّل الضغط بعلبة إدارة الضاغط ، أي ضغط خط السحب بالأسطوانة أ التي تحوي منفاخ ب يتحرك لأعلى أو أسفل تبعاً لاتزان القوى المؤثرة عليه ، فمن أعلى يوجد الضغط الجوي وضغط زنبرك ومن أسفل ضغط السحب . فبزيادة ضغط خط السحب يتحرك المنفاخ إلى أعلى مسبباً حركة الذراع جـ إلى أعلى أيضاً . عندئذ يغلق الذراع جـ جزءاً من





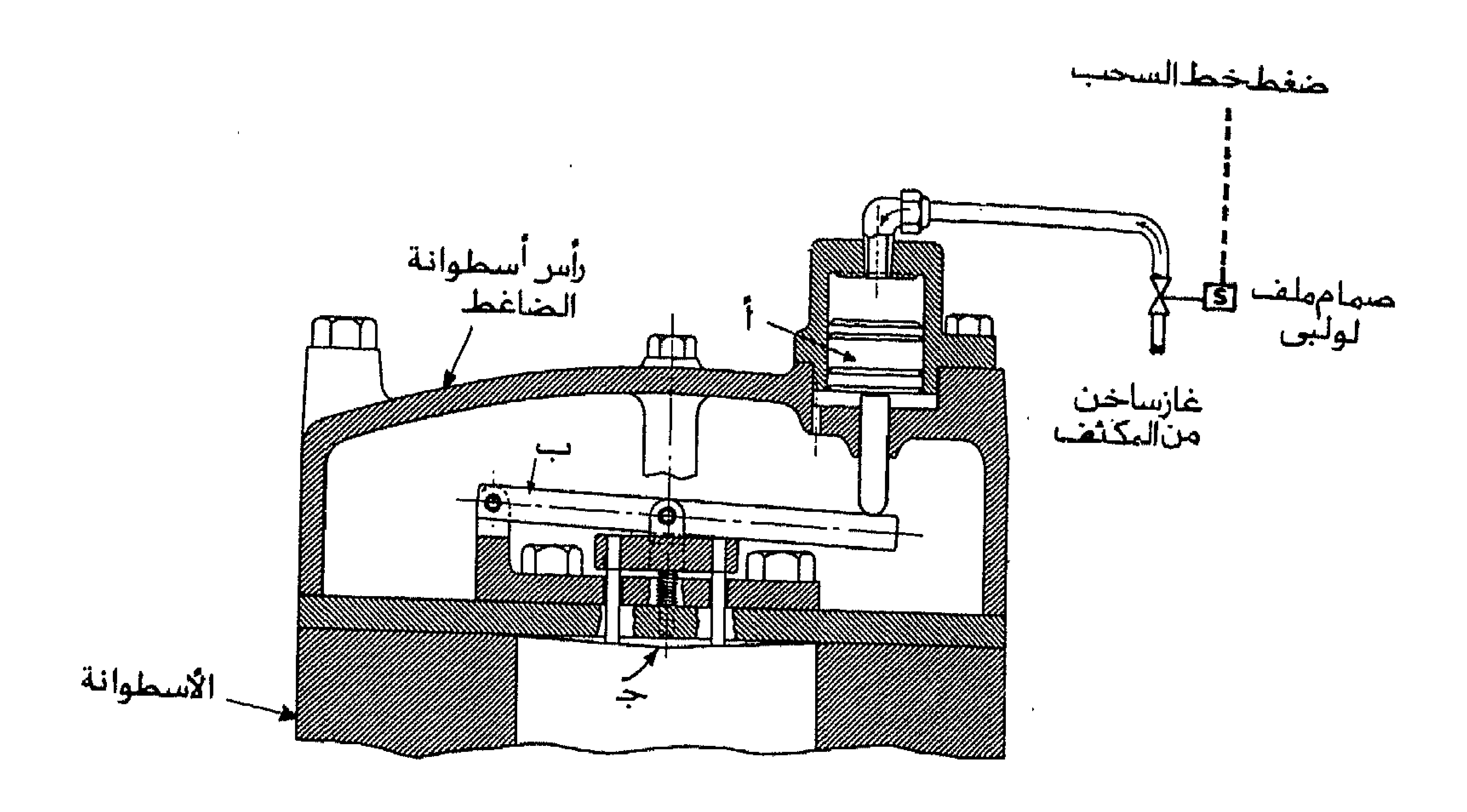
شكل ٣٨ . ٥ نظام ميكانيكي لتحميل أو تفريغ أسطوانة أو أكثر بالضاغط ، ويعمل هذا النظام بضغط السحب للضاغط [ترين ١٩٧٧] . الحالة العليا : تحميل الأسطوانة ، والحالة السفلى : تفريغ الأسطوانة .

فتحة تسرب الزيت من الأسطوانة د ، فيزيد ضغط الزيت داخل هذه الأسطوانة ، فيتحرك الكباس بها إلى أعلى ضد ضغط الزنبرك حيث تفتح فتحة الزيت الواصلة إلى الأسطوانة س . يتغلب ضغط الزيت بالأسطوانة س على قوة الزنبرك أسفل الكباس ص فيتحرك الكباس إلى أسفل ، وبالتالي يتحرك مسمار هذا الكباس معه إلى أسفل ولا يلامس صمام

سحب الضاغط . يعمل صمام السحب عندئذ بطريقة طبيعية أى أن أسطوانة الضاغط تصبح محمله . بانخفاض حمل التبريد يقل ضغط سحب الضاغط فيتغلب ضغط الزنبرك والضغط الجوي بالأسطوانة أ على هذا الضغط فيتحرك المنفاخ ب إلى أسفل مما يسبب تحرك الذراع جـ إلى أسفل ، فيزيد تسرب الزيت من الأسطوانة د ، فيقل ضغط الزيت في هذه الأسطوانة فيتحرك الكباس بها إلى أسفل . عندئذ يتسرب الزيت الموجود بالأسطوانة س إلى الأسطوانة د حيث يخرج من فتحة التسرب في أسفل هذه الأسطوانة . كنتيجة لعدم وجود ضغط زيت بالأسطوانة س يتحرك الكباس بها إلى أعلى تحت تأثير قوة الزنبرك ، فيصطدم مسمار الكباس بصمام السحب ويرفعه إلى أعلى حيث يبقى مفتوحاً باستمرار مما يعمل على تفريغ (عدم تحميل) الأسطوانة .

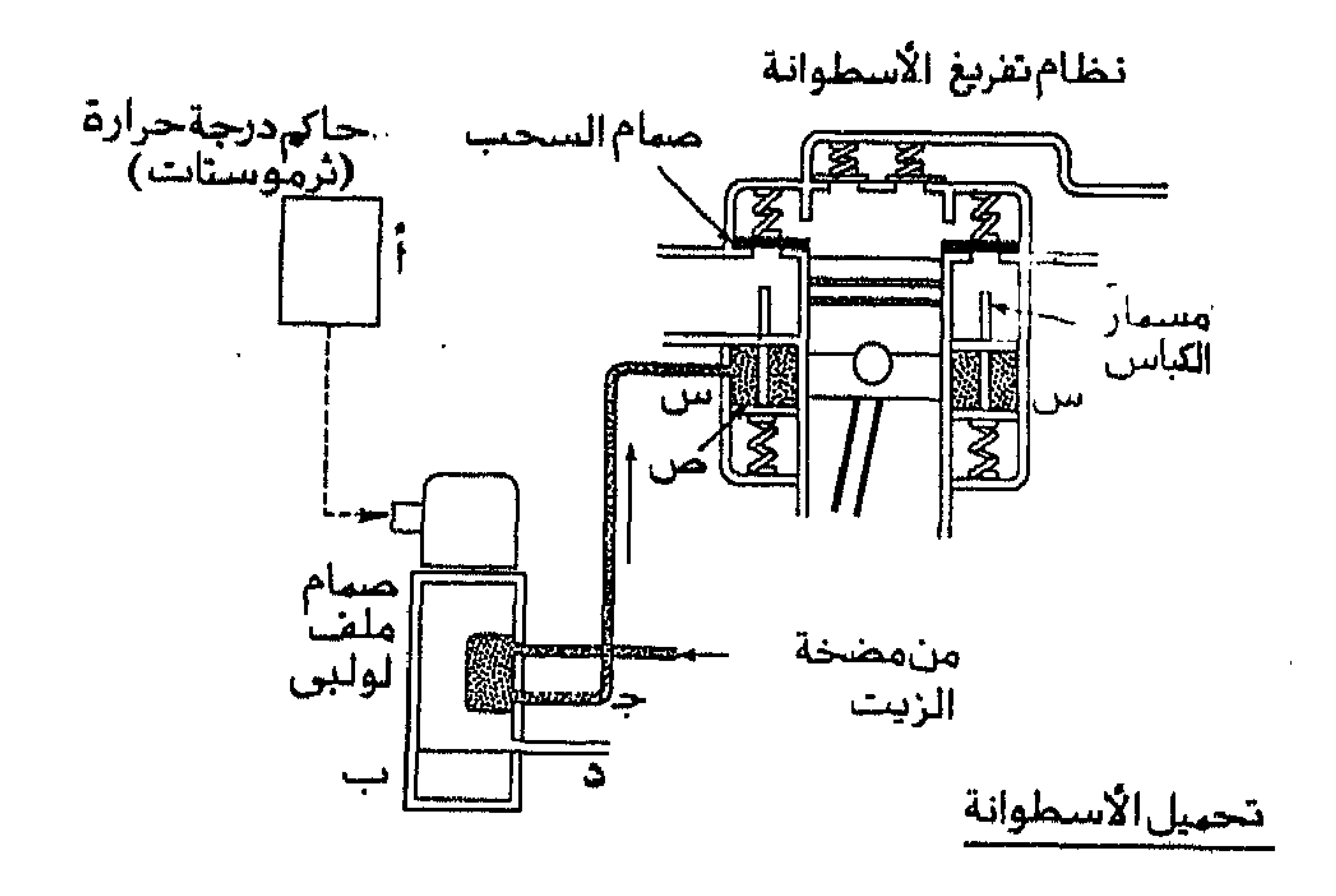
ويوضح شكل ٥.١٩ نظام آخر لتفريغ واحدة من أسطوانات الضاغط . ويتم تنشيط هذا النظام بضغط السحب أيضاً كالنظام السابق . فبانخفاض ضغط السحب عن مستوى القطع لأسطوانة ما ، يفتح صمام ملف لولبي لتوصيل وحدة تحميل وتفريغ الأسطوانة بغاز ساخن من الخط الواصل إلى المكثف . يعمل ضغط الغاز الساخن على دفع كباس أ إلى أسفل حتى يلامس الذراع ب الذي يعمل على فتح صمام السحب جـ وحفظه في هذا الوضع مما يعني تفريغ الأسطوانة . وبارتفاع حمل التبريد ، يرتفع ضغط السحب عن مستوى القطع للأسطوانة فيغلق صمام الملف اللولبي لمنع الغاز الساخن من التأثير على الكباس أ مما يؤدي إلى حركة الكباس أ إلى أعلى . عندئذ يعمل صمام السحب جـ بطريقة عادية وتصبح الأسطوانة محملة .

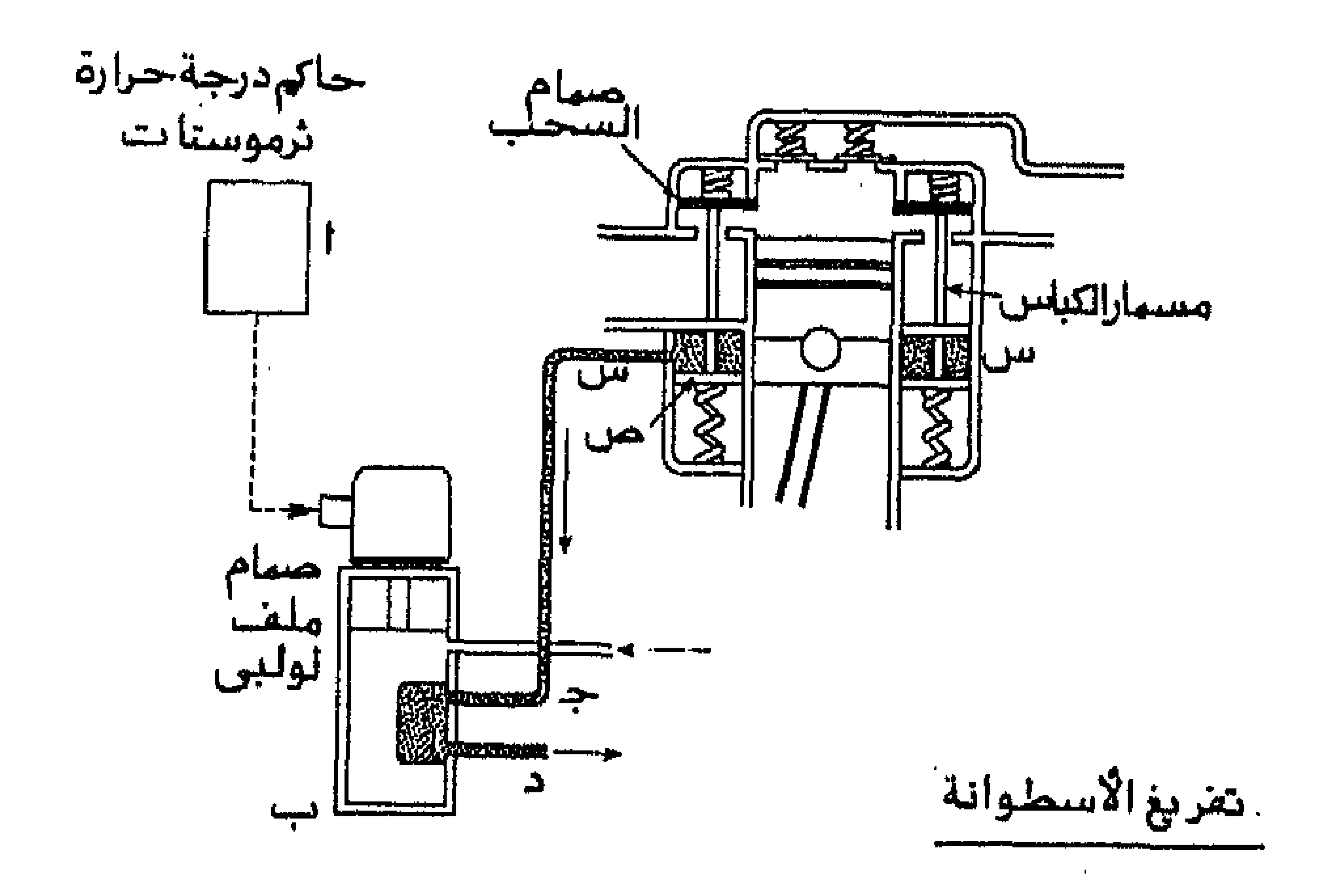
يوضح شكل ٥.٢٠ نظام ميكانيكي لتحميل أو تفريغ أسطوانات الضاغط ، يعمل بثرموستات لقياس درجة حرارة المبخر . وفي هذا النظام يستخدم ثرموستات أ للتحكم في صمام ملف لولبي ب ثلاثي الاتجاهات يعمل على تحميل أو تفريغ أحدى أسطوانات الضاغط . فبارتفاع درجة حرارة الحمل الحراري أو المبخر (أي ارتفاع ضغط السحب) يعمل



شكل ١٩ . ٥ نظام ميكانيكي لتحميل أو تفريغ إحدى أسطوانات الضاغط يعمل بضغط الغاز الساخن من المكثف [دوسات ، ١٩٨١] .

الثرموستات على توصيل تيار كهربائي إلى صمام الملف اللولبي الذي يعمل على توصيل الزيت القادم من مضخة الزيت بالأسطوانة س . يتغلب ضغط الزيت على الزنبرك أسفل الكباس فيتحرك الكباس إلى أسفل ومعه مسمار الكباس . يستقر صمام السحب في هذا الوضع في وضعه المعتاد فتصبح الأسطوانة محملة . بانخفاض الحمل الحراري ، تنخفض درجة حرارة الحمل الحراري فيعمل الثرموستات على قطع التيار الكهربائي عن صمام الملف اللولبي مما يجعل هذا الصمام يصل خط الزيت من الأسطوانة س بفتحة تسرب الزيت د . ينتج عن هذا دفع الزنبرك للكباس ص إلى أعلى فيدفع مسمار الكباس صمام السحب إلى الأعلى دون السماح لهذا الصمام بالغلق مرة أخرى مما يعني تفريغ الأسطوانة .





شكل ٥.٢٠ نظام ميكانيكي لتحميل أو تفريغ أسطوانة أو أكثر بالضاغط ، ويعمل هذا النظام بثرموستات لقياس درجة الحرارة [ترين ، ١٩٧٧] .

وتُسْتَخْدَم الطرق السابقة أيضاً لتخفيض العزم اللازم لبداية تشغيل الضاغط ، بالإضافة إلى استخدام هذه الطرق عند أحمال التبريد الجزئية .

مثال ٥.٧

في مثال ٥.١ إهمل فقد الضغط في صمامي السحب والطرد ، وكذلك إهمل التسخين خلال مشوار السحب ثم ارسم العلاقة بين تغيير سعة التبريد وقدرة الانضغاط للضاغط مع درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) وذلك بفرض ضاغط بدون تفريغ أي أسطوانة ، وبتفريغ أسطوانتين ، وبتفريغ ثلاث أسطوانات . إذا صمم الضاغط بحيث يتم تفريغ أسطوانة واحدة إذا قل حمل التبريد عن ٧٥٪ من قيمة التصميم لحمل التبريد (المناظر لدرجة حرارة قدرها -١٠° م بالمبخر) ، وتفريغ أسطوانتين إذا قل حمل التبريد عن ٥٠٪ من قيمة التصميم ، أوجد :

أ) درجة حرارة المبخر التي يتم عندها تفريغ أسطوانة واحدة بالضاغط

ب) درجة حرارة المبخر التي يتم عندها تفريغ أسطوانتين بالضاغط

جـ) سعة التبريد المناظرة لدرجة حرارة بالمبخر قدرها -٢٥° م وقدرة الانضغاط بالضاغط المناظرة لسعة التبريد.

الحل

من معطيات ونتائج مثال ٥.١ ، ومن ملحق أ لخواص مبرد ٢٢ ، وباستخدام الحالات ١ ، ٢ ، ٣ كما هو مبين بشكل ٥.٩ ، والمعادلتين ٥.١٦ و ٥.١٧ يمكن إعداد جدول ٥.١ حيث التذييل ١ يعني حالة الخروج من المبخر ، وقد فرضت حالة تشبع . وفي هذا الجدول تم تعين المؤشر الأيزنتروبي γ من شكل ٥.٥ بدلالة درجة حرارة المبخر ودرجة حرارة المكثف .

من مثال ٥.١ تكون قيمة إزاحة الكباس $\overline{PD}$ مساوية ٠.٠٤٣ م^٣/ث عند استخدام ضاغط بدون تفريغ أي أسطوانة ، و ٠.٠٣٢٣ م^٣/ث عند تفريغ أسطوانة واحدة ، و ٠.٠٢١٥ م^٣/ث عند تفريغ أسطوانتين (فقط يعدل عدد الأسطوانات المحملة بالضاغط في مثال ٥.١

جدول ٥.١ ملخص حسابات مثال ٥.٧ .

T_1	v_1	h_1	P_1	γ	$\frac{\dot{Z}}{PD}$	$\frac{\dot{W}}{PD}$
°م	م^٣/كجم	كيلوچول/كجم	كيلوبسكال	—	كيلوچول/م^٣	كيلوچول/م^٣
١٠ −	٠.٠٦٥١	٤٠٠.٨	٣٥٤.٧	١.١٢	١٨٩٠	٥٩١
٢٠ −	٠.٠٩٢٥	٣٩٦.٨	٢٤٥.٣	١.١٢٥	١٢١٧	٤٨٠
٣٠ −	٠.١٣٥	٣٩٢.٥	١٦٣.٩	١.١٣٥	٧٣٤	٣٦٠
٤٠ −	٠.٢٠٥	٣٨٨.١	١٠٥.٣	١.١٤٥	٣٩٥	٢٤٠

للحصول على القيم السابقة) . عندئذ تحسب قيم $\dot{Z}$ و $\dot{W}$ لأي درجة حرارة بالمبخر عند الأحمال الجزئية كما هو معطى بجدول ٥.٢ وباستخدام النتائج السابقة .

ويوضح شكل ٥.٢١ علاقات تغير سعة التبريد وقدرة الانضغاط بالضاغط للأحمال الجزئية المعطاه بالجدول . ومن الشكل ينتج الآتي

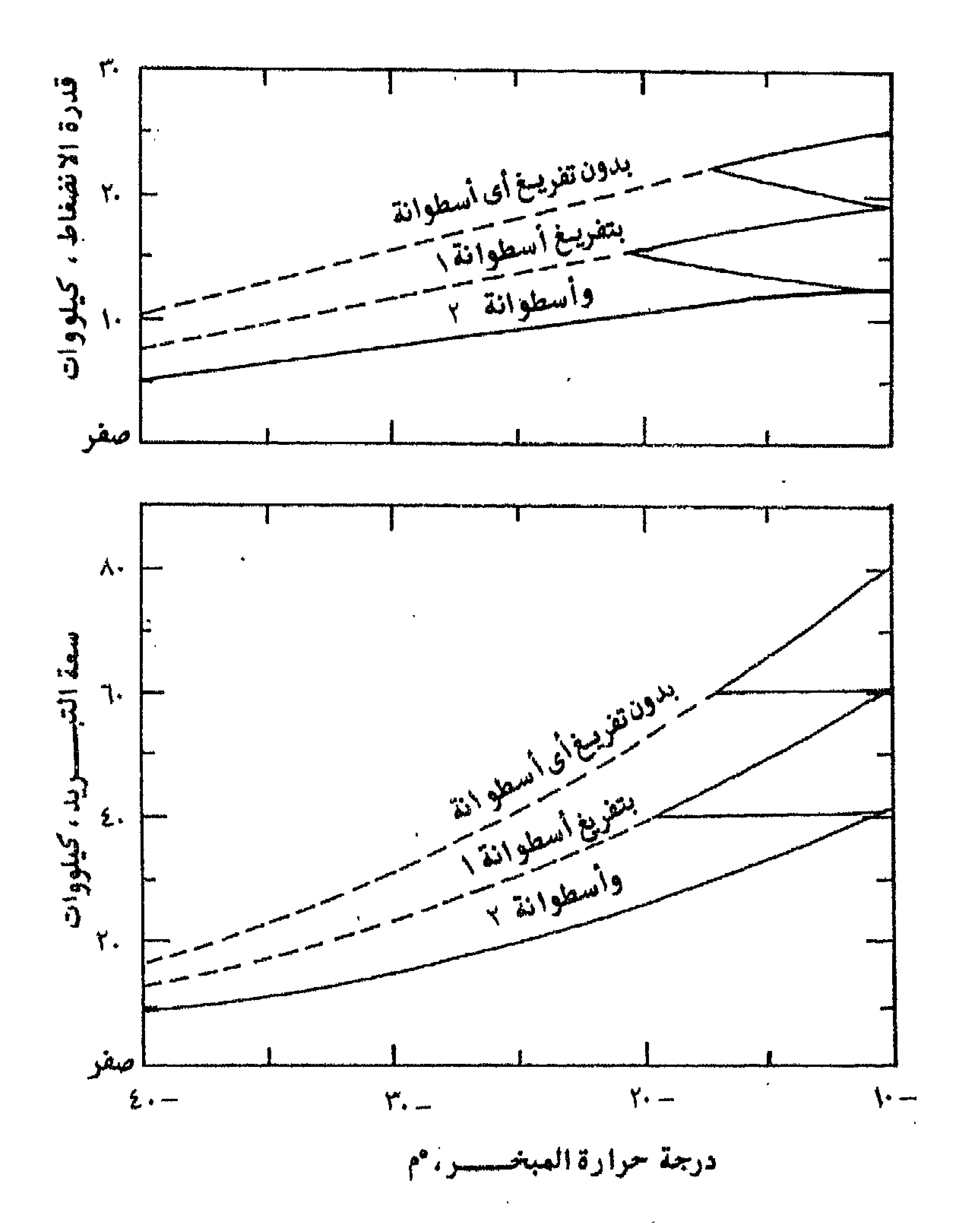
جدول ٥.٢ حسابات سعة التبريد والقدرة لمثال ٥.٧ .

T_1	بدون تفريغ		تفريغ أسطوانة		تفريغ أسطوانتين	
	$\dot{Z}$	$\dot{W}$	$\dot{Z}$	$\dot{W}$	$\dot{Z}$	$\dot{W}$
°م	كيلووات		كيلووات		كيلووات	
١٠ −	٨١.٣	٢٥.٤	٦١.٠	١٩.٠	٤٠.٦	١٢.٧
٢٠ −	٥٢.٣	٢٠.٦	٣٩.٢	١٥.٥	٢٦.٢	١٠.٣
٣٠ −	٣١.٦	١٥.٥	٢٣.٧	١١.٦	١٥.٨	٧.٧
٤٠ −	١٧.٠	١٠.٣	١٢.٧	٧.٧	٨.٥	٥.٢

أ) تفرغ الأسطوانة الأولى من الحمل عندما تقل درجة حرارة المبخر إلى – ١٧ °م .

ب) تفرغ أسطوانتان من الحمل إذا قلت درجة حرارة المبخر عن –٢٠ °م .

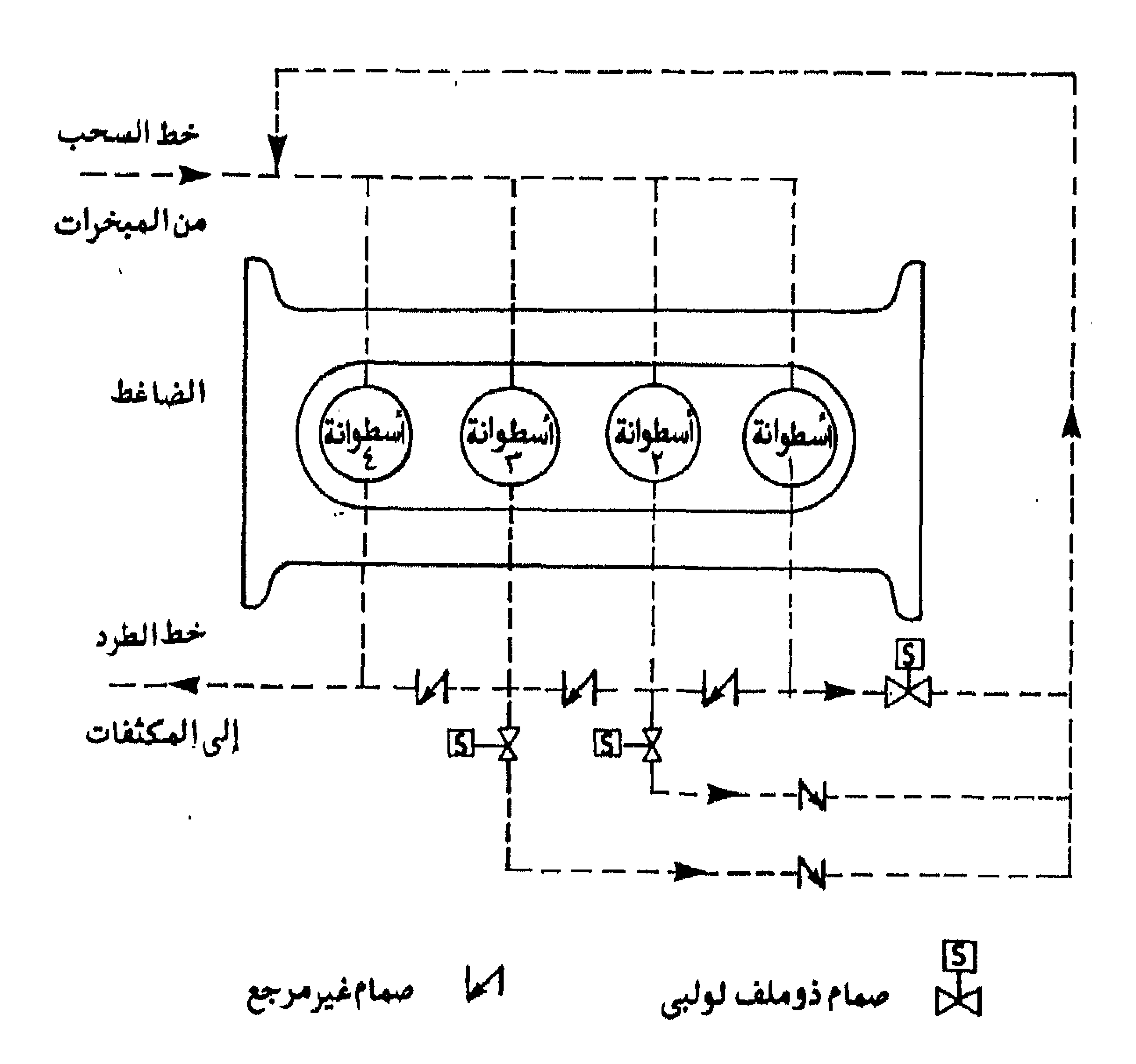
جـ) عند درجة حرارة مبخر تساوى – ٢٥ °م تقل سعة التبريد إلى ٥ . ٢٠ كيلووات أي حوالي ٢٥٪ من قيمة التصميم لحمل التبريد (٣ . ٨١ كيلووات) وتكون عندئذ قدرة الانضغاط مساوية لحوالي ٥ . ٩ كيلووات .



شكل ٢١ . ٥ تغير سعة التبريد وقدرة الانضغاط مع درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) لمثال ٧ . ٥ .

٥.٩.٤ تجنيب الغاز الساخن الناتج من اسطوانة او اكثر إلى خط السحب

في هذه الطريقة للتحكم في سعة تبريد الضاغط يجنب الغاز الساخن الناتج من أسطوانة أو أكثر إلى خط السحب ، ويتم هذا التجنيب عن طريق استخدام صمام ملف لولبي على خط جانبي لإعادة الغاز الساخن الناتج من الأسطوانة إلى خط السحب مرة أخرى ، مما يعادل ضغط الطرد بهذه الأسطوانة بضغط خط السحب وبالتالي تفرغ الأسطوانة وتقل قدرة تشغيلها إلى المقدار اللازم للتغلب على الاحتكاك فقط . ويوضح شكل ٥.٢٢ نظاماً يعمل بهذه الطريقة حيث يمكن تجنيب الغاز الساخن من أسطوانة إلى



شكل ٥.٢٢ تجنيب الغاز الساخن من أسطوانة أو أكثر إلى خط السحب ، مثال نمطي : ضاغط به ٤ أسطوانات .

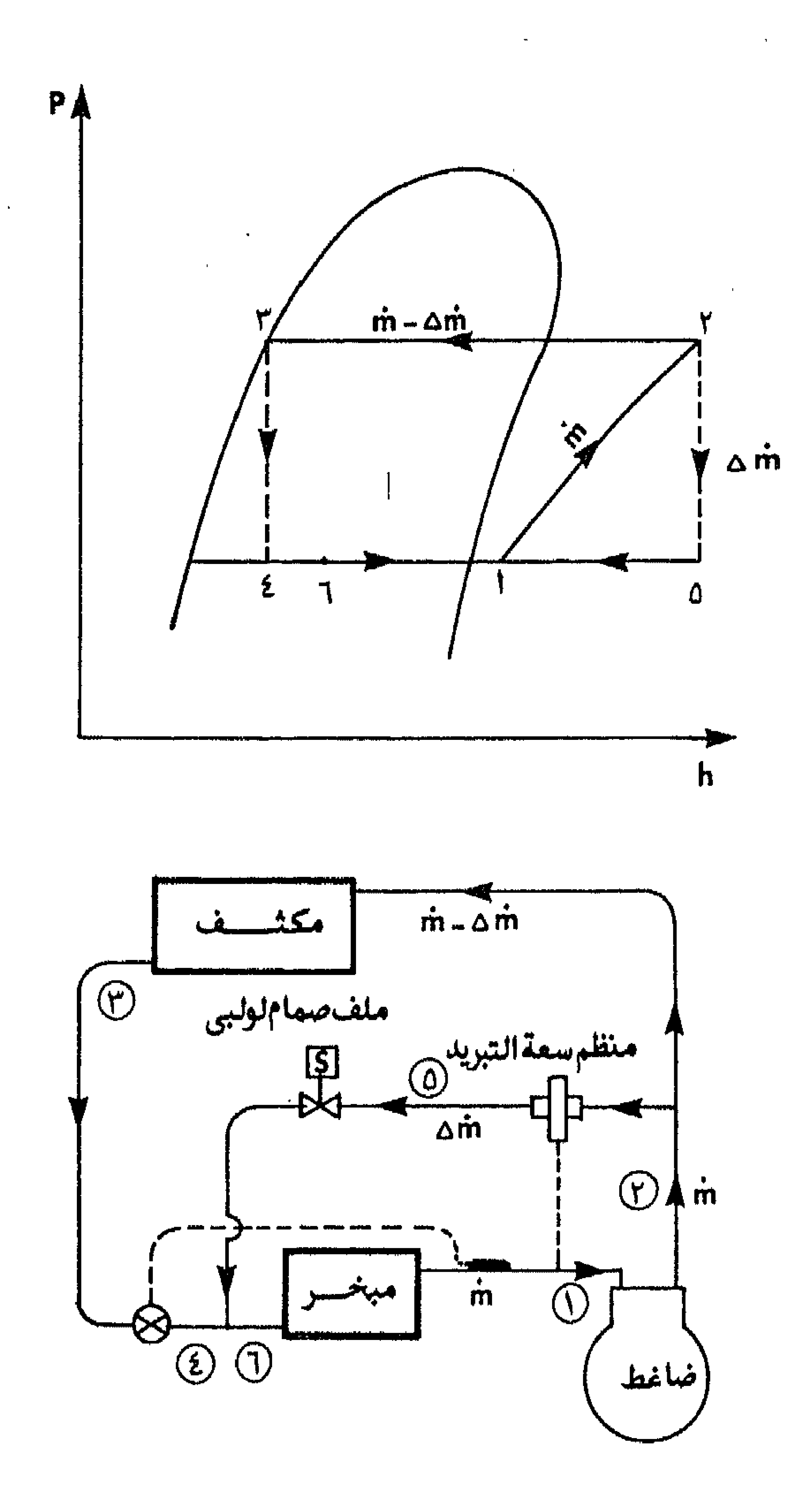
ثلاث أسطوانات – تبعاً لانخفاض حمل التبريد – إلى خط السحب . لاحظ وجود صمامات غير مرجعه في الخطوط المختلفة لضمان عدم سريان الغاز الساخن من أسطوانة إلى أخرى .

وتعمل صمامات الملف اللولبي بالترتيب تبعاً لضغط خط السحب . فبانخفاض حمل التبريد ينخفض ضغط خط السحب ، حتى إذا انخفض هذا الضغط عن مستوى القطع الأول قام صمام الملف اللولبي بخط التجنيب لأسطوانة ١ بالفتح فيتم تفريغ هذه الأسطوانة . وبانخفاض حمل التبريد مرة أخرى ، ينخفض ضغط خط السحب عن مستوى القطع الثاني ، فيقوم صمام الملف اللولبي بخط تجنيب الأسطوانة ٢ بالفتح فيتم تفريغ هذه الأسطوانة أيضاً بالإضافة إلى الأسطوانة ١ ، وهكذا . أما عند زيادة حمل التبريد، فيرتفع ضغط السحب ، فتُحَمّل الأسطوانة ٣ ، فإذا زاد مرة أخرى تُحَمّل الأسطوانة ٢ ، ثم الأسطوانة ١ على التوالي ، تبعاً لضغط خط السحب .

وتماثل علاقة تغير سعة التبريد وقدرة الانضغاط مع درجة حرارة المبخر (ضغط خط السحب) العلاقات الموضحة بشكل ٥.١٧ . وتستخدم هذه الطريقة أيضاً لخفض العزم عند بداية التشغيل بتفريغ معظم الأسطوانات ثم تحمل الأسطوانات بعد ذلك تدريجياً أسطوانة تلو الأخرى .

٥.٩.٥ تجنيب جزء من الغاز الساخن من الضاغط إلى دخول المبخر أو خط السحب

وتهدف هذه الطريقة إلى التحكم في سعة تبريد الضاغط مع تجنب انخفاض ضغط السحب للضاغط عن حد السماح ، ويوضح شكل ٥.٢٣ كيفية استخدام هذه الطريقة . فبانخفاض حمل التبريد في المبخر ينخفض ضغط سحب الضاغط فيبدأ منظم سعة التبريد في الانفتاح تدريجياً لتمرير جزء من الغاز الساخن مباشرة إلى دخول المبخر



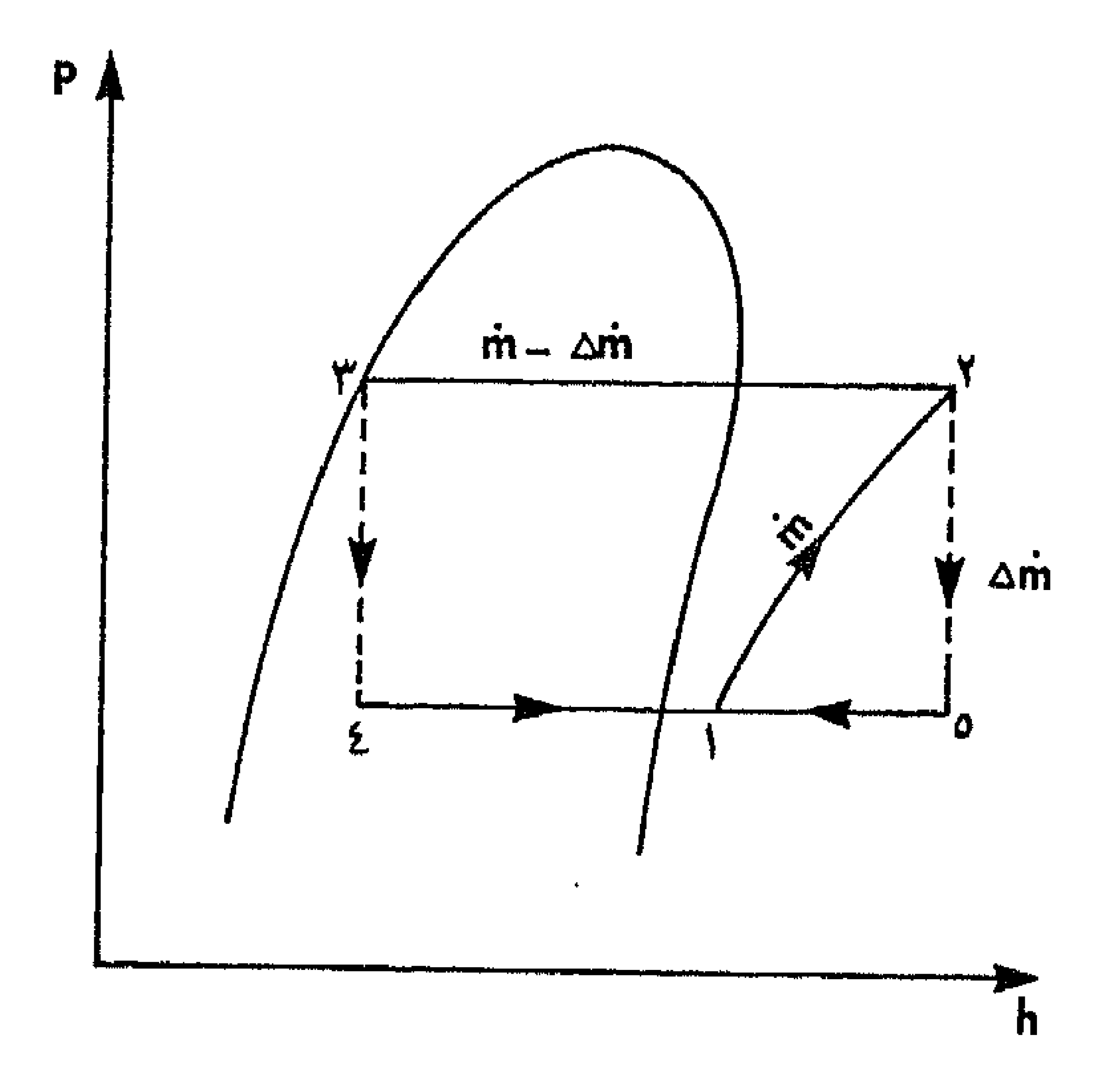
شكل ٢٣ . ٥ التحكم في سعة التبريد بتجنيب جزء من الغاز الساخن إلى دخول المبخر .

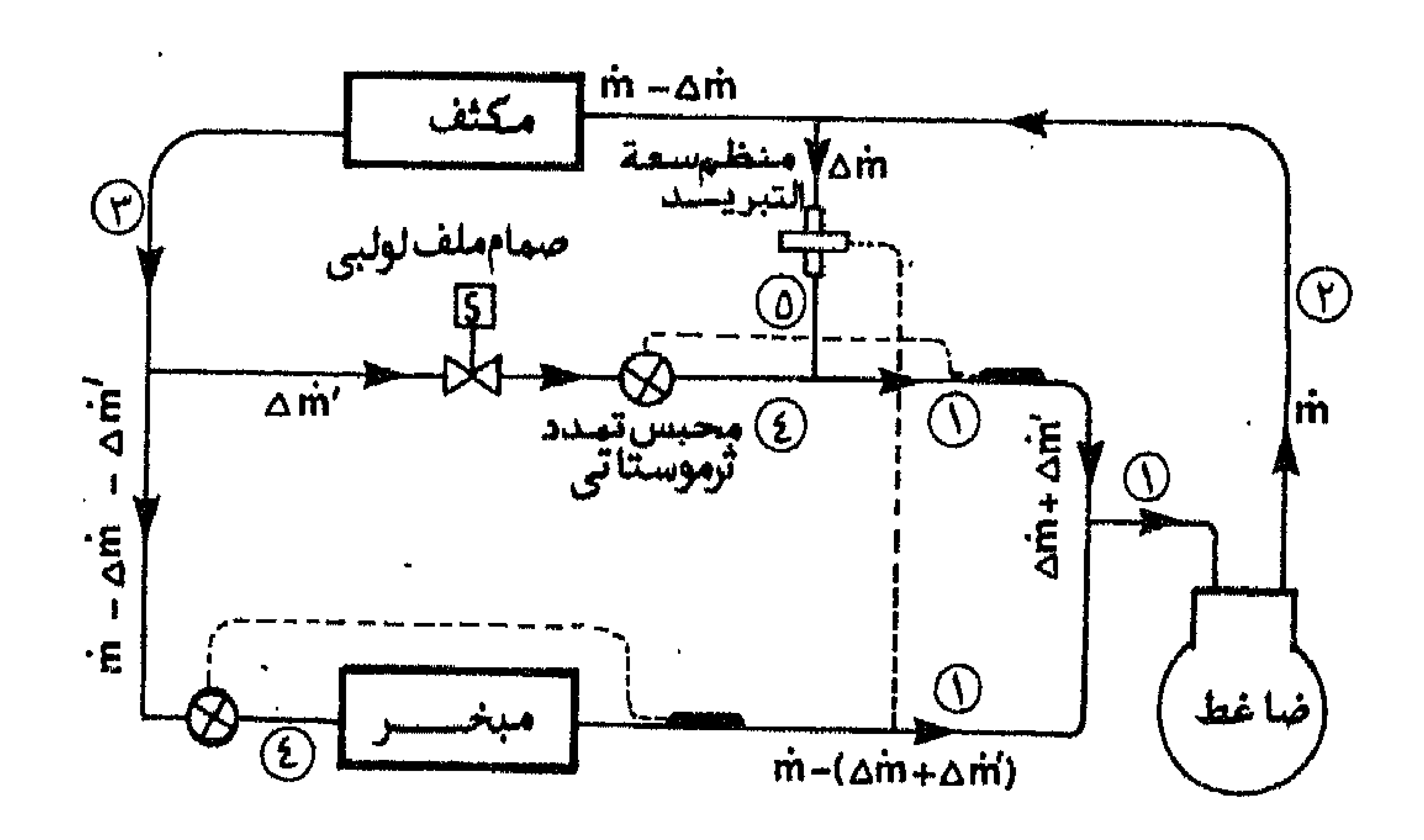
وتجنيب مرور هذا الجزء من الغاز للمكثف . ويعمل هذا الغاز الساخن كحمل تبريد زائف للمبخر . وتزداد درجة انفتاح المنظم كلما انخفض حمل التبريد بالمبخر . ويراعى في حالة استخدام موزع المبرد بين محبس التمدد والمبخر أن يتم إرجاع الغاز الساخن عند موضع الدخول إلى الموزع .

ومن أهم عيوب هذه الطريقة عدم توفير أي جزء من قدرة تشغيل الضاغط بانخفاض حمل التبريد . ويلزم الإشارة هنا إلى ضرورة وضع صمام ملف لولبي على خط تجنيب الغاز الساخن كما هو موضح بالشكل ، وذلك في حالة النظم التي تعمل بضخ تفريغ عند إيقاف الضاغط . عندئذ يغلق صمام الملف اللولبي للسماح للضاغط بتفريغ المبخر قبل الإيقاف بصرف النظر عن حمل التبريد ولا يسمح الصمام بعودة أي غاز ساخن إلى مدخل المبخر.

في الطريقة السابقة تزيد تكلفة خط تجنيب الغاز الساخن كلما بعد المبخر عن الضاغط . عندئذ قد يجنب الغاز الساخن إلى خط السحب بدلاً من دخول المبخر كما هو موضح بشكل ٥.٢٤ . في هذه الحالة يلزم خلط الغاز الساخن بمقدار مناسب من سائل التبريد القادم من المكثف لحماية موتور الضاغط من التسخين الزائد . ويستخدم لهذا الغرض محبس تمدد ثرموستاتي للتحكم في مقدار سريان سائل التبريد اللازم للمحافظة على خط السحب عند مقدار معقول من درجات التحميص (حوالي ٥ °م عادة) كما هو الحال عند الخروج من المبخر . ويجب أن يكون موضع بصيلة محبس التمدد الثرموستاتي عند مسافة لا تقل عن حوالي ١.٥ متر من دخول الضاغط لضمان وجود مسافة كافية لتبخير أي قطرات من سائل مائع التبريد قبل دخول الضاغط .

وتستخدم طريقة تجنيب الغاز الساخن مع العديد من الضواغط خاصة ضواغط الأمونيا . وفي حالة استخدام هذه الطريقة مع ضواغط الهالوكربونات وتجنيب الغاز الساخن إلى دخول المبخر ، تمتاز الطريقة بالمحافظة على سرعة مناسبة للمبرد تكفي لحمل زيت التزييت معه إلى الضاغط عند جميع الأحمال ، ومهما قل حمل التبريد . كما تمتاز طريقة تجنيب الغاز الساخن أيضاً بالتحكم في سعة تبريد الضاغط مع حمل التبريد، ويمكن للضاغط العمل من ١٠٠٪ حمل تبريد إلى صفر٪ حمل تبريد . لذا تستخدم طريقتا الغاز الساخن وتفريغ أسطوانات الضاغط معاً للتحكم في سعة تبريد الضاغط . وفي هذه





شكل ٢٤ . ٥ التحكم في سعة التبريد بتجنيب جزء من الغاز الساخن إلى خط السحب .

الحالة تستخدم طريقة تفريغ أسطوانات الضاغط حتي يقل حمل التبريد إلى حده الأدنى عندئذ تستخدم طريقة تجنيب الغاز الساخن للتحكم في سعة تبريد الضاغط إذا قل حمل التبريد عن هذا الحد الأدنى للطريقة الأولى . ومن أهم عيوب طريقة تجنيب الغاز الساخن هو استهلاك قدرة تشغيل الضاغط بمعدل ثابت مع تغير حمل التبريد حتى عند انخفاض حمل التبريد إلى قيمة صغيرة .

ولحساب معدل الغاز الساخن أو نسبته إلى معدل السريان الكلي بالضاغط ، نهمل التغير في ضغط السحب مع سعة التبريد ثم نفرض أن معدل الكتلة الكلية هو $\dot{m}$ وأن معدل الغاز الساخن المطلوب تجنيبه هو $\Delta\dot{m}$ وأن سعة التبريد القصوى عند شروط التصميم هي $\dot{Z}$ وأن سعة التبريد انخفضت إلى $\dot{Z}'$. باعتبار عودة الغاز الساخن إلى مدخل المبخر (شكل ٢٣ . ٥) فإن الاتزان الحراري للمبخر يعطي الآتي

$$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Z} - \dot{Z}'}{\dot{m}\ (h_2 - h_3)} \tag{5.18}$$

وبفرض أن عملية الانضغاط أيزنتروبية ، تكتب المعادلة السابقة أيضاً في الصورة الآتية

$$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{COP}{1 + COP}\ (1 - \frac{\dot{Z}'}{\dot{Z}}) \tag{5.19}$$

حيث COP هي معامل الأداء عند حمل التصميم $\dot{Z}$.

كذلك باعتبار عودة الغاز الساخن إلى مدخل خط السحب ، شكل ٢٤ . ٥ ، وبفرض أن $\Delta\dot{m}$ هي معدل الغاز الساخن المطلوب تجنيبه عند سعة تبريد جزئية $\dot{Z}'$ ، وبفرض أن $\Delta\dot{m}'$ هي معدل المبرد القادم من المكثف للخلط مع الغاز الساخن $\Delta\dot{m}$ ، فإن الإتزان الحراري لنقطة الخلط يعطي

$$\Delta\dot{m}\ h_2 + \Delta\dot{m}'\ h_3 = (\Delta\dot{m} + \Delta\dot{m}')\ h_1$$

كذلك يعطى الاتزان الحراري للمبخر الآتي

$$\{\ \dot{m} - (\Delta\dot{m} + \Delta\dot{m}')\ \}\ (h_1 - h_3) = \dot{Z}'$$

وبفرض أن عملية الانضغاط أيزنتروبية أيضاً ، فإن المعادلتين السابقتين تعطيان الآتي

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{COP}{1 + COP} \left(1 - \frac{\dot{Z}'}{\dot{Z}} \right) \tag{5.20}$$

$$\frac{\Delta \dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{1}{1 + COP} \left(1 - \frac{\dot{Z}'}{\dot{Z}} \right) \tag{5.21}$$

حيث COP هي معامل الأداء لدورة التبريد عند حمل التصميم $\dot{Z}$.

مثال ٨ . ٥

في مثال ٥ . ٧ أستخدم طريقة تجنيب الغاز الساخن إلى دخول المبخر للتحكم في سعة التبريد . احسب معدل الغاز الساخن المطلوب تجنيبه وشغل الانضغاط عند سعة تبريد قدرها ٥ . ٢٠ كيلووات.

الحل

حيث أن نقطة التصميم في مثال ٥ . ٧ هي عند درجة حرارة بالمبخر قدرها – ١٠ ° م ودرجة حرارة بالمكثف قدرها ٥٠ ° م ، فإن حمل التبريد عند التصميم يكون ٨١ . ٣ كيلووات (من مثال ٥ . ٧) ، ويكون معامل الأداء عندئذ كما يلي

$$COP = \frac{81.3}{25.4} = 3.2$$

ويقدر معدل السريان لمبرد ٢٢ عند نقطة التصميم كما يلي

$$\dot{m} = \frac{\dot{Z}}{(h_1 - h_3)} = \frac{81.3}{(400.8 - 263)} = 0.59 \quad \text{kg/s}$$

باستخدام معادلة (٥ . ١٩) نجد أن

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{3.2}{1 + 3.2} (1 - \frac{20.5}{81.3}) = 0.57$$

ومنها نجد أن

$$\Delta \dot{m} = 0.57 \times 0.59 = 0.336 \quad kg/s$$

وتبقى قدرة الانضغاط عند نفس قيمة التصميم ، أي بقيمه قدرها ٢٥,٤ كيلووات كما هو معطى بمثال ٥,٧ .

مثال ٥,٩

أعد حل مثال ٥,٨ باستخدام التحكم في سعة التبريد بتجنيب الغاز الساخن إلى خط السحب .

الحل

من المعادلتين (٥,٢٠) و (٥,٢١) نجد الآتي على التوالي

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{3.2}{1 + 3.2} (1 - \frac{20.5}{81.3}) = 0.57$$

$$\frac{\Delta \dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{1}{1 + 3.2} (1 - \frac{20.5}{81.3}) = 0.178$$

ومنها ينتج الآتي

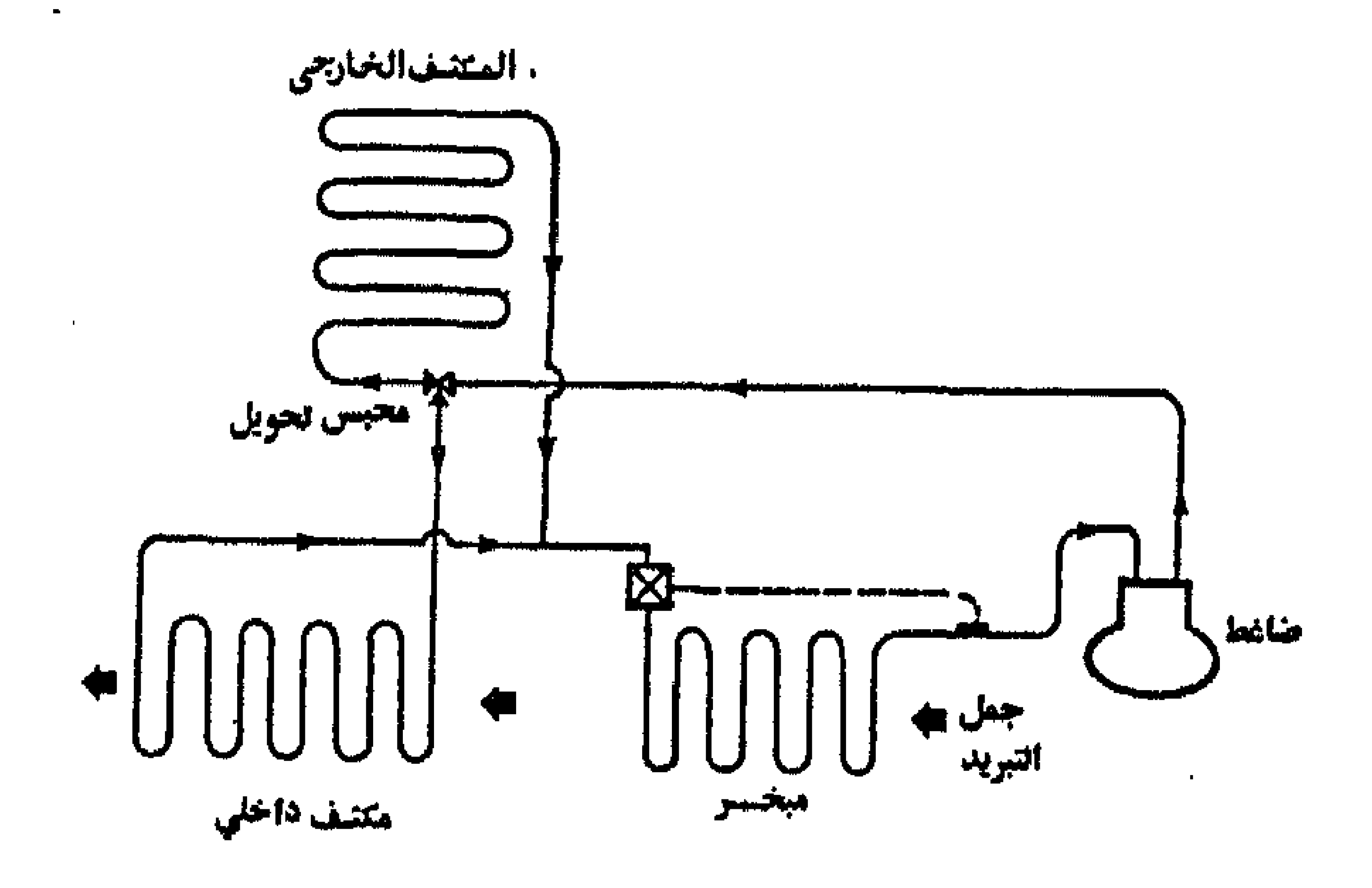
$$\Delta \dot{m} = 0.57 \times 0.59 = 0.336 \quad kg/s$$

$$\Delta \dot{m}' = 0.178 \times 0.59 = 0.105 \quad kg/s$$

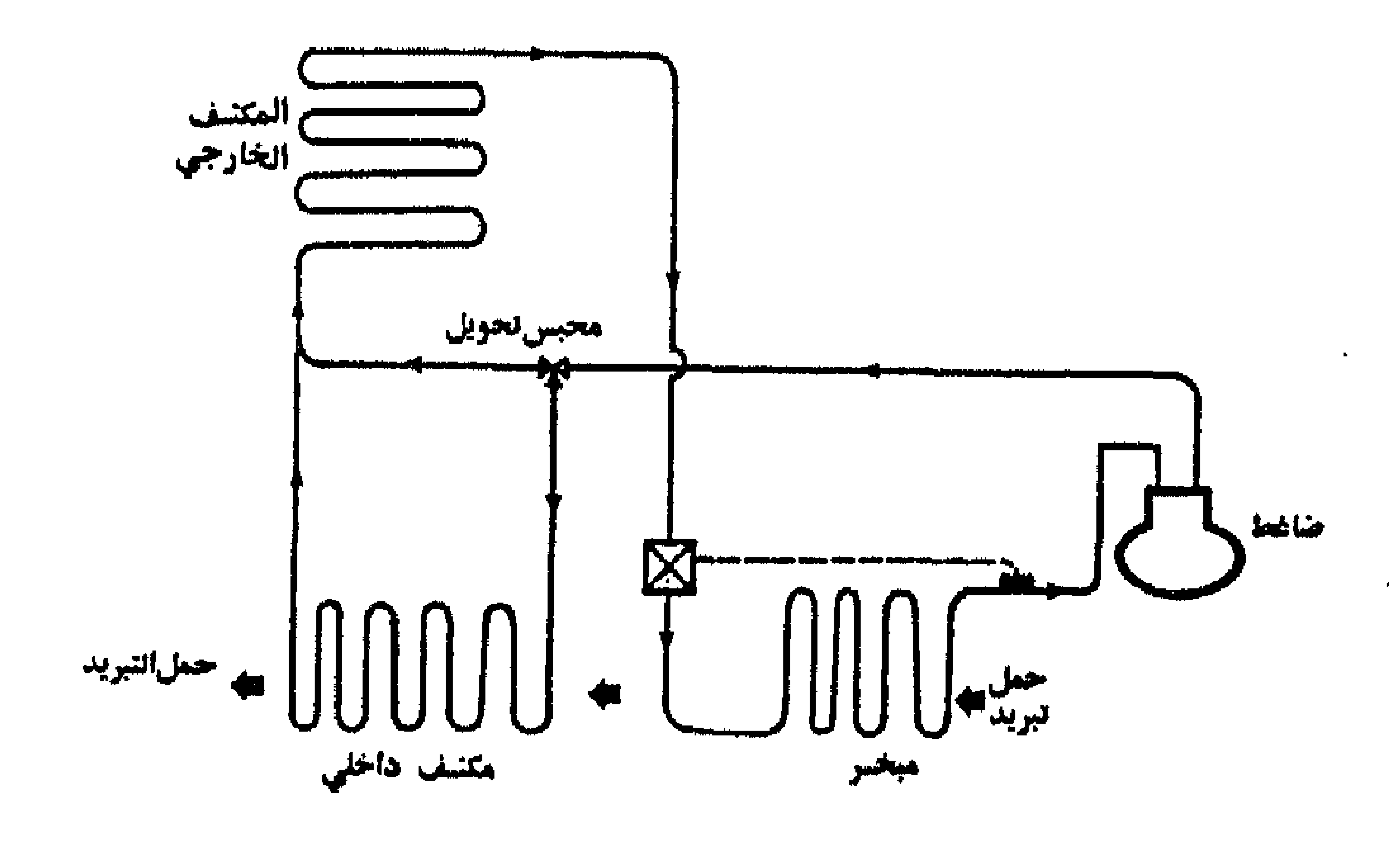
وتبقى قدرة الانضغاط ثابتة أيضاً بنفس قيمتها عند نقطة التصميم ، أي ٢٥,٤ كيلووات.

٥.٩.٦ استرجاع الطاقة باستخدام مكثف داخلي

تستخدم هذه الطريقة في تكييف الهواء عند الحاجة إلى نزع الرطوبة دون الحاجة إلى تخفيض كبير في درجة حرارة الهواء . وفي هذه الطريقة يتم تركيب مكثف داخلي إلى جوار المبخر . ويمكن تركيب المكثف الداخلي على التوالي أو التوازي مع المكثف الخارجي



توصيل مكثف داخلي على التوازي مع المكثف الخارجي



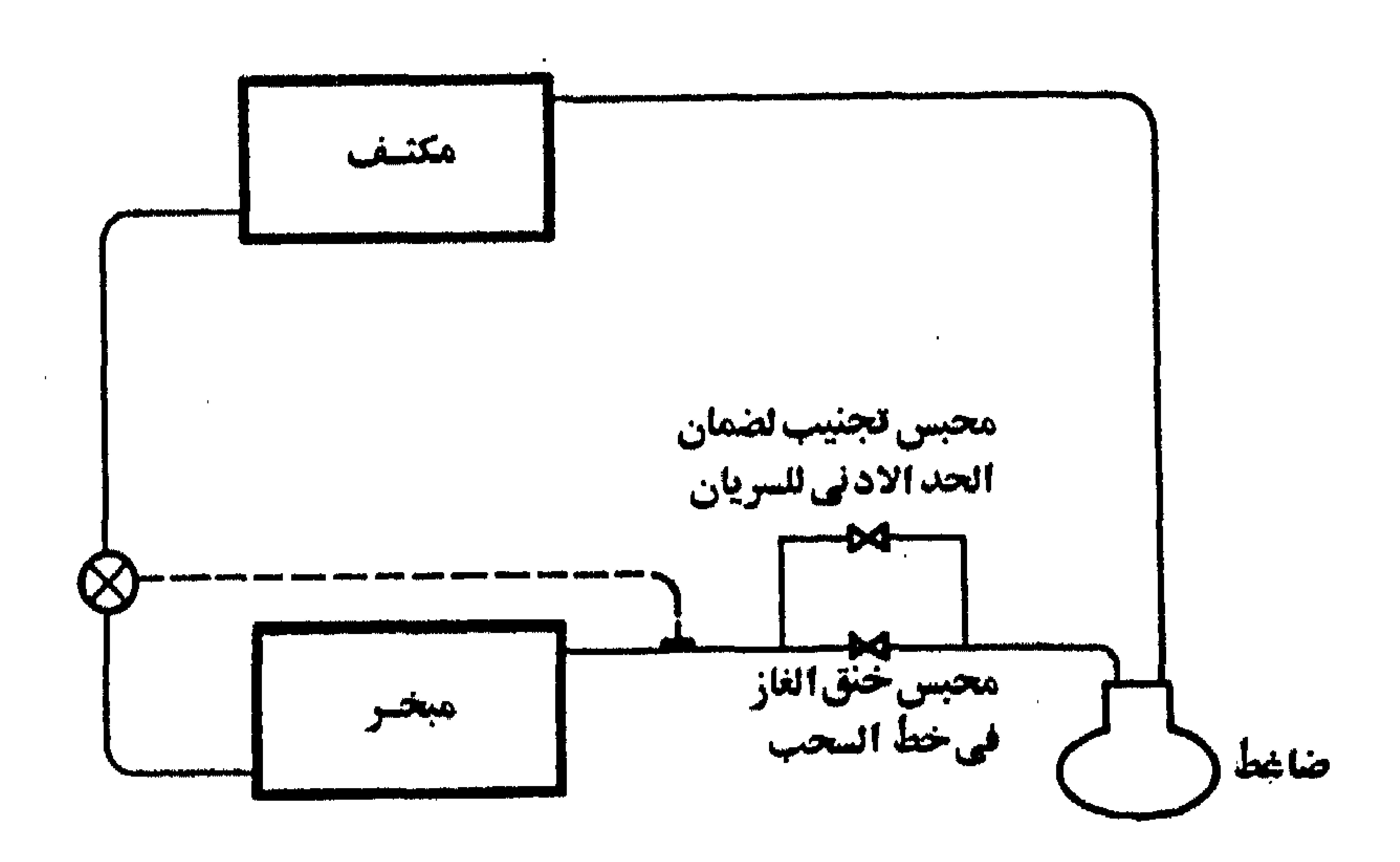
توصيل مكثف داخلي على التوالي مع مكثف خارجي

شكل ٥,٢٥ استرجاع الطاقة باستخدام مكثف داخلي.

كما هو موضح بشكل ٥.٢٥ . ويتم التحكم في تشغيل محبس لتحويل جزء من الغاز الساخن بحاكم درجة حرارة (ثرموستات) يعمل عند درجة حرارة الهواء الخارج من ملفات المبخر . وتمتاز هذه الطريقة بسهولة التطبيق ودقة التحكم ، إلا أنه من أهم عيوبها استهلاك طاقة تشغيل الضاغط القصوى عند جميع الأحمال ، دون إمكانية توفير هذه الطاقة عند الأحمال الجزئية .

٥.٩.٧ خنق ضغط السحب

في هذه الطريقة يوضع محبس خنق بخط السحب إلى الضاغط كما هو موضح بشكل ٥.٢٦ . فإذا انخفض حمل التبريد يرسل حاكم درجة حرارة الحمل الحراري (ثرموستات) إشارة إلى محبس خنق الغاز فيبدأ في الإقفال مما يسبب انخفاض ضغط السحب فيقل معدل سريان المبرد خلال الضاغط فتقل سعة التبريد بالمبخر . ويلزم عند استخدام هذه الطريقة للتحكم في سعة التبريد تركيب محبس تجنيب لضمان سريان حد



شكل ٥.٢٦ استخدام محبس خنق الغاز بخط السحب للتحكم في سعة التبريد.

أدنى من المبرد إلى الضاغط لمنع تلفه في حالة انخفاض حمل التبريد بدرجة كبيرة . وتسمح هذه الطريقة للتحكم في خفض سعة التبريد في حدودمن ١٥إلى ٤٠٪ ، أما إذا مازاد الانخفاض في حمل التبريد عن هذه النسبة فيعمل حاكم الضغط المنخفض بالضاغط على إيقاف موتور الضاغط .

٥٫١٠ التثبيت والتهوية والاهتزاز والضوضاء

تحتاج الضواغط إلى رعاية خاصة عند تثبيتها وتوصيلها إلى دائرة التبريد لمراعاة التهوية لهذه الضواغط وكذلك الاهتزازات والضوضاء الصادرة عنها . ويختار مكان تثبيت الضاغط إلى مناقشة هذا الموضوع هندسياً مع المهندس المعماري المسئول عن تصميم المبنى ، حتى لا يؤثر وجود الضاغط على الفائدة المطلوبة من المساحات المختلفة للمبنى . ويجب أن يثبت الضاغط في مكان لا يحتمل تساقط المياه عليه ، أو حمايته من تساقط المياه إن وجدت ، كما يجب أن يسمح المكان حول الضاغط بإجراء الصيانة العادية له وللمعدات الأخرى الموجودة بجانبه كالمكثف مثلاً ، في بعض الأحيان .

ولتثبيت الضاغط يلزم توفر سطح أفقي ذي متانة كافية لتحمل ثقل الضاغط والاهتزازات الصادرة عنه . ويجب تثبيت الضاغط جيداً إلى الأرضية بحيث لا يُسْمَح له بالحركة في أي اتجاه حتي لا يسبب هذا كسر خطوط المبرد المتصلة به . وفي بعض الأحيان قد يفضل إعداد صبة اسمنتية ملساء السطح وبسمك معين لتثبيت الضاغط . ويَعْطِي مصنعو الضواغط عادة المواصفات الخاصة لهذه الصبة وطريقة تثبيت الضاغط إليها .

لا تحتاج الضواغط المغلقة أو نصف المغلقه عادة أي تهوية حيث يتم تبريد موتورات هذه الضواغط ببخار المبرد من خط السحب كما قدمنا سابقاً ، أما الضواغط المفتوحة

فتحتاج الموتورات التي تدير هذه الضواغط إلى تبريد . ويتم تبريد هذه الموتورات عادة بالهواء المحيط بالموتور ، لذا يلزم عند اختيار مكان الموتور مراعاة هذا الأمر بأن يُسْمَح بتهوية كافية لتبريد الموتور ، فإذا ثُبِتَ الضاغط في حيز محدود كغرفة مثلاً ، لزم وجود شباك للتهوية بهذه الغرفة إذا كان حجم الغرفة يزيد عن الحجم الموصي به بجدول ٥.١ وإلا تعرض الموتور للتسخين الزائد ومن ثم التلف . وتؤخذ القيم المعطاه بجدول ٥.٢ فقط كقيم تقريبية إذا لم يوصي مُصنّعو الضاغط بأي مواصفات خاصة . أما إذا وضع الضاغط في حيز مغلق تماماً أو قل حجم الغرفة عن الحجم الموصى به في جدول ٥.٣ ، فيلزم عندئذ وجود تهوية قسرية ويعطي جدول ٥.٣ أيضاً قيماً إرشادية لهذا الغرض ، ويشترط في هذا الحين أن تكون درجة حرارة الهواء المستخدم للتهوية أقل من درجة حرارة الهواء الخارجي أو مساوية له .

جدول ٥.٣ متطلبات التهوية لموتورات الضواغط المفتوحة [ترين ، ١٩٧٧] .

قدرة الموتور كيلووات	حجم الغرفة * متر^{٣}	تهوية قسرية * * متر^{٣} /ث	قدرة الموتور كيلووات	حجم الغرفة * متر^{٣}	تهوية قسرية * * متر^{٣} /ث
٢	١٧	٠.١٥	٢٢	٧٠	١.٢٣
٤	٢٤	٠.٢٤	٣٠	٨٠	١.٤٢
٥.٥	٣١	٠.٣٣	٣٧	٨٨	١.٦٠
٧.٥	٣٧	٠.٤٣	٤٥	٩٥	١.٩
١٠	٤٧	٠.٦١	٥٦	١٠٤	٢.٧٠
١٥	٥٧	٠.٨٥	٧٥	١١٤	٣.٣١
١٨	٦٤	١.٠٠			

* أقل حجم للغرفة مسموح به للتهوية الطبيعية .

* * أقل معدل سريان هواء لتهوية قسرية .

ينشأ عن الضاغط اهتزاز بتردد f_c . وينشأ هذا الاهتزاز عن الأجزاء الدوارة والمتحركة بالضاغط بالإضافة إلى وجود جزء غير متزن بالضاغط . وينتقل هذا الاهتزاز بقوة مؤثرة إلى المبنى وإلى خطوط المبرد المتصلة بالضاغط ، مما قد يؤدي في بعض الأحيان إلى تكسير بعض المعدات وخطوط المبرد المتصلة بالضاغط . وللحماية من هذه الأضرار يلزم عزل المبنى ، وعزل خطوط المبرد من هذه الاهتزازات .

يعزل المبنى عادة بوضع عازل مرن أسفل الضاغط بين الضاغط والمبنى ، وقد يثبت هذا العازل في بعض الأحيان إلى صبة سميكة من الخرسانة المسلحة . وتعتمد القوة المنقولة من الضاغط إلى المبنى نتيجة الاهتزاز على انتقالية العازل τ ، وهي نسبة القوة المنقولة بالعازل إلى القوة الناتجة عن الضاغط . وتعطي قيمة τ كما يلي [أشراي ، ١٩٨٩]

$$\tau = \left| \frac{1}{1 - (f_c / f_n)^2} \right| \tag{5.22}$$

حيث f_n هي تردد الاهتزاز الطبيعي للعازل . وتعطي قيمة هذا الاهتزاز كما يلي [أشراي، ١٩٨٩]

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k}{M} \right)^{0.5} \tag{5.23}$$

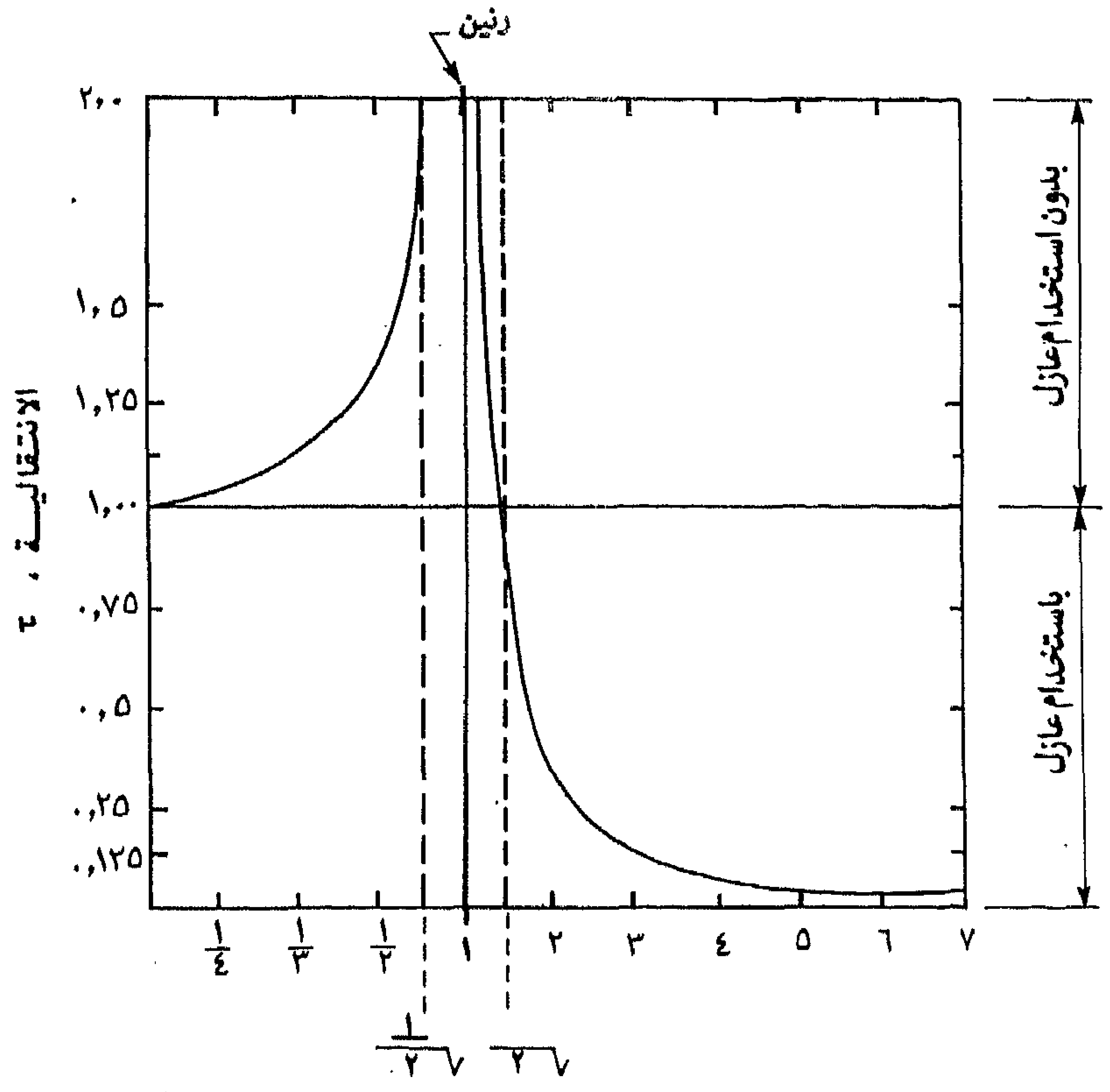
حيث k هي صُلبِيّة العازل و M هي كتلته ، ويمكن أيضاً كتابة المعادلة السابقة بالصورة الآتية الأكثر شيوعاً [أشراي ، ١٩٨٩] ، حيث f_n بوحدات الهرتز :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} = 15.76 / \sqrt{\delta_{st}} \tag{5.24}$$

حيث g هي عجلة الجاذبية الأرضية و δ_{st} هي الانحراف الإستاتيكي لعازل الاهتزازات (مم).

وتعرف δ_s بأنها مقدار إزاحة العازل عند تحميله بالضاغط دون وجود أي اهتزازات .

ويبين شكل ٢٧. ٥ تغير انتقالية العازل أسفل الضاغط مع النسبة بين تردد اهتزاز الضاغط إلى تردد الاهتزاز الطبيعي للعازل . ويتضح من الشكل ضرورة أن تكون نسبة f_c إلى f_n أكبر من ٥ حتى تقل الانتقالية إلى قيمة صغيرة (أقل من ٠.١) . كما يبين الرسم خطورة أن تكون قيمة f_c قريبة من f_n حيث تزيد الانتقالية إلى قيم كبيرة قد تسبب تكسير المعدات وتصدع بعض أجزاء المبنى . وتستخدم عدة مواد ومكونات لعزل الاهتزاز ،



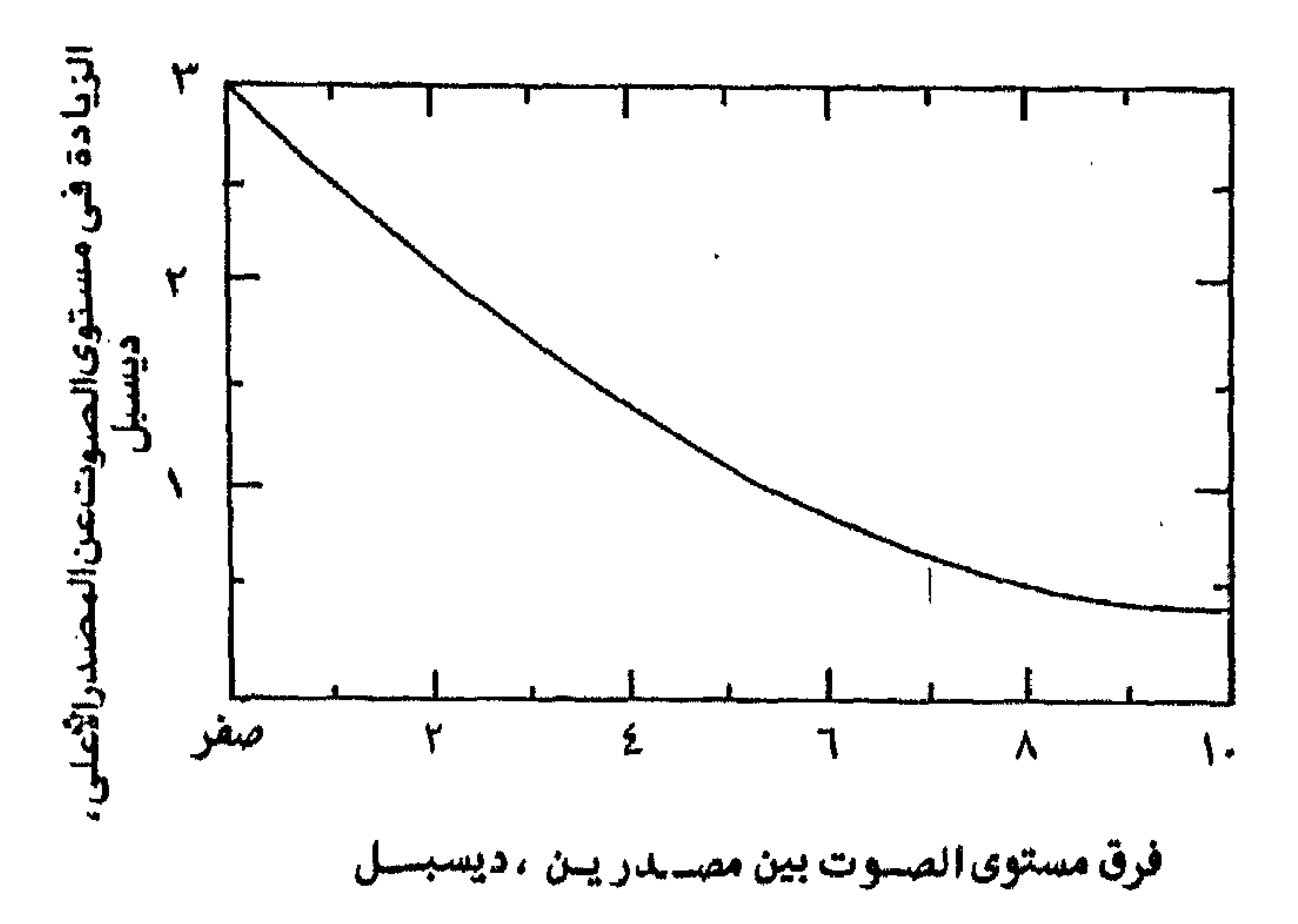
شكل ٢٧ . ٥ تغير الانتقالية مع نسبة تردد اهتزاز الضاغط إلى تردد الاهتزاز الطبيعي لعازل الاهتزاز [أشراى ١٩٨٩،].

منها على سبيل المثال الوسائد المطاطية ، والدعامات المطاطية ، ووسائد الفيبرجلاس والزنبركات اللولبية ، والزنبركات الهوائية وغيرها . ولمزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى فصل ٥٢ في [الآشراي ، ١٩٨٧] .

ولعزل الاهتزازات الصادرة من الضاغط عن خطوط السحب والطرد ينصح عادة بتركيب وصلات مرنة عند سحب وطرد الغاز . ويمكن أيضاً استخدام ما لا يقل عن ٣ أكواع ٩٠° بخطي السحب والطرد من الضاغط بحيث لا تقل المسافة المستقيمة بين كل كوع وآخر عن ١٠ مرات قطر الخط ، وتساعد هذه الطريقة لتوصيل خطي السحب والطرد على وجود المرونة الكافية لإضعاف انتقالية اهتزاز الضاغط [ترين ، ١٩٧٧] .

وينشأ عن الضواغط أيضاً ضوضاء بمستوى معين ويلزم على مصمم نظم التبريد الا تزيد هذه الضوضاء عن حد السماح لمكان وجود الضاغط والأماكن الأخرى المحيطة به . وقد يتطلب الأمر في بعض الأحيان الخاصة الاستعانة ببعض الخبراء والمختصين في هذا الموضوع، إلا أنه في بعض الأحيان الأخرى قد يكون الحل بسيطاً إذا كان مهندس التبريد ملماً ببعض مبادئ الصوتيات . فمثلاً بقياس إجمالي مستوى الضوضاء الناشئ عن مصادر أخرى غير الضاغط ومقارنته بمستوى الضوضاء الناتج عن الضاغط قد لا يحتاج مهندس التبريد إلى خفض ضوضاء الضاغط وتوفير ما قد يتطلبه هذا الأمر من نفقات . فمن المبادىء الأولية لعلم الصوتيات إذا كان هناك مصدران للضوضاء فإن إجمالي الضوضاء لا يكون مجموع الضوضاء الصادرة عن المصدرين ، وإنما يزيد مستوى الضوضاء الإجمالي عن مستوي الضوضاء لأكبر هذين المصدرين ضوضاء بمقدار معين فقط ، وتعتمد هذه الزيادة على الفرق العددي بين قيمتي مستويي الضوضاء للمصدرين ، كما هو موضح بشكل ٥.٢٨ .

فمثلاً إذا كان مستوى ضوضاء الضاغط ٥٠ ديسبل ، وكان مستوى الضوضاء المحيط هو ٦٠ ديسبل أي أن الفرق بين المصدرين ١٠ ديسبل ، فإن شكل ٥.٢٨ يعطي إجمالي



شكل ٥.٢٨ مستوى الصوت الإجمالي لمصدرين [ستوكر وجونز ، ١٩٨٢] .

مستوى ضوضاء للضاغط والضوضاء المحيطة قدره ٦٠.٥ ديسبل، .وهذا لا يعني أي ضرورة للإنفاق لتخفيض مستوى الضوضاء الصادرة من الضاغط .

ويمكن تخفيف ضوضاء الضاغط بعدة طرق منها تركيب كاتم صوت على خطي السحب والطرد بالضاغط . كما يمكن تخفيف الضوضاء بوضع الضاغط داخل حيز مغلق فيعمل هذا إلى حد كبير على تخفيف الضوضاء . أيضاً ، تخفف الضوضاء بتبطين حوائط الغرفة الحاوية للضاغط بمواد خاصة تعمل على امتصاص قدر كبير من الضوضاء الناشئة عن الضاغط .

مثال ٥.١٠

ضاغط وزنه ٤٠٠ كجم وضع على عازل اهتزاز له صُلبيّة قدرها ١٦٠٠٠ نيوتن/م ، فكان الانحراف الإستاتيكي للعازل قدره ٢٢ مم . يعمل الضاغط بسرعة دوران قدرها ١٤٥٠ لفة/دقيقة باهتزاز له تردد قدره ١٢.٣ هرتز ، وينتج عن هذا قوة قدرها ٣٨٠ نيوتن ، احسب القوة التي ينقلها العازل إلى المبنى .

الحل

من معادلة ٢٤ . ٥ يحسب تردد الاهتزاز الطبيعي للعازل كما يلي

$$f_n = 15.76 / \sqrt{22} = 3.36 \quad Hz$$

وتكون نسبة تردد اهتزاز الضاغط إلى هذا الاهتزاز كما يلي

$$\frac{f_c}{f_n} = \frac{12.3}{3.36} = 3.66$$

من شكل ٢٧ . ٥ أو من معادلة ٢٢ . ٥ نجد أن الانتقالية = ٨١. . . ومنها تحسب القوة المنقولة إلى المبنى كما يلي

$$F_t = 0.081 \times 380 = 30.8 \quad N$$

٦

الضواغط الأخرى موجبة الإزاحة

٦.١ مقدمة

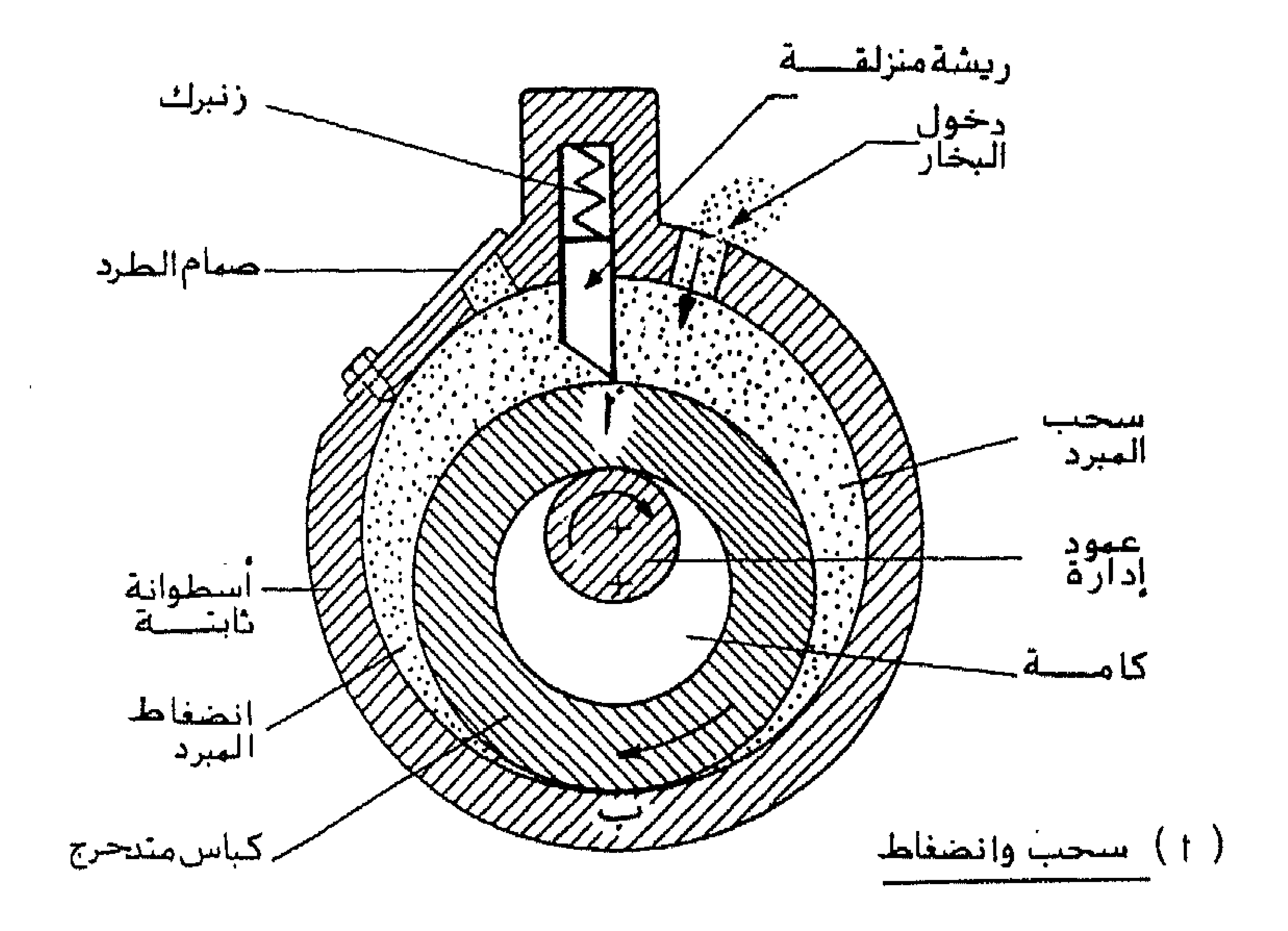
قدمنا في الفصل الخامس الضواغط الترددية ، وهي ضواغط موجبة الإزاحة كما بينا سابقاً . أما الفصل الحالي فيعرض باقي أنواع ضواغط الإزاحة الموجبة وهي الضواغط الدورانية والضواغط اللولبية . وسنعرض في الفصل القادم الضواغط الديناميكية (ضواغط الطرد المركزي) .

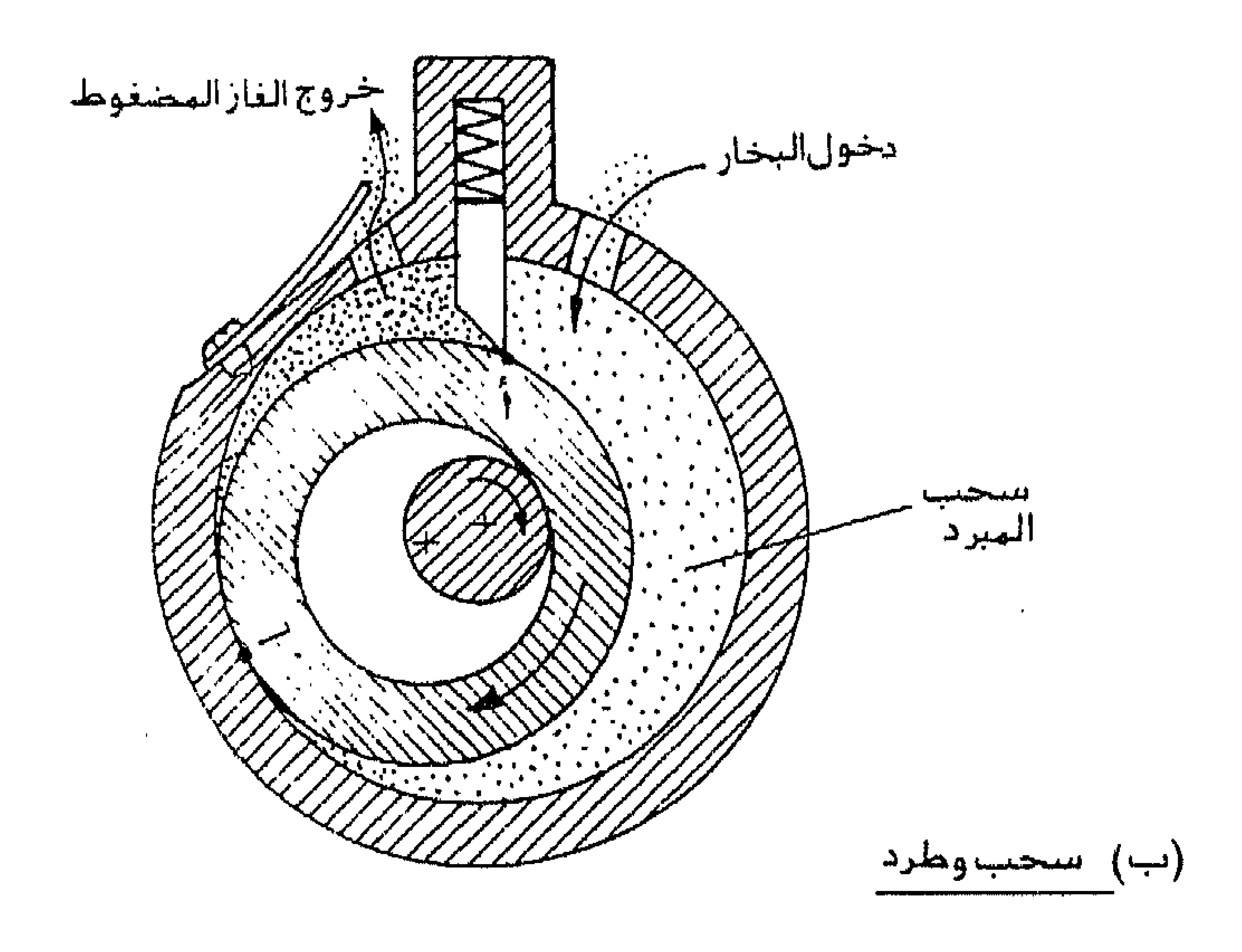
ويعتمد استخدام أنواع الضواغط الأربعة السابقة الذكر في تطبيقات التبريد وتكييف الهواء إلى حد كبير على سعة التبريد المطلوبة من الضاغط . فبينما تُسْتَخدم الضواغط الترددية عادة في التطبيقات التي تحتاج إلى سعة تبريد أقل من حوالي ٣٠٠ كيلووات تبريد ، فإن ضواغط الطرد المركزي تُسْتَخدم عندما تزيد سعة تبريد الضاغط عن

حوالي ٥٠٠ كيلووات تبريد . ويكثر استخدام الضواغط اللولبية في سعات التبريد التي تقع بين الحد الأعلى للضاغط الترددي والحد الأدنى لضاغط الطرد المركزي . ففي سعات التبريد التي تتقارب من ٢٠٠ إلى ٣٠٠ كيلووات ينافس الضاغط اللولبي إلى حد كبير الضاغط الترددي . كذلك ينافس الضاغط اللولبي ضاغط الطرد المركزي في سعات التبريد ما بين ٥٠٠ إلى ٥٠٠٠ كيلووات تبريد . وتستخدم الضواغط الدورانية عادة في تطبيقات التبريد الصغيرة مثل الثلاجات المنزلية ووحدات الشباك لتكييف الهواء ، مما يجعلها منافساً قوياً للضواغط الترددية .

٦.٣ الضواغط الدورانية

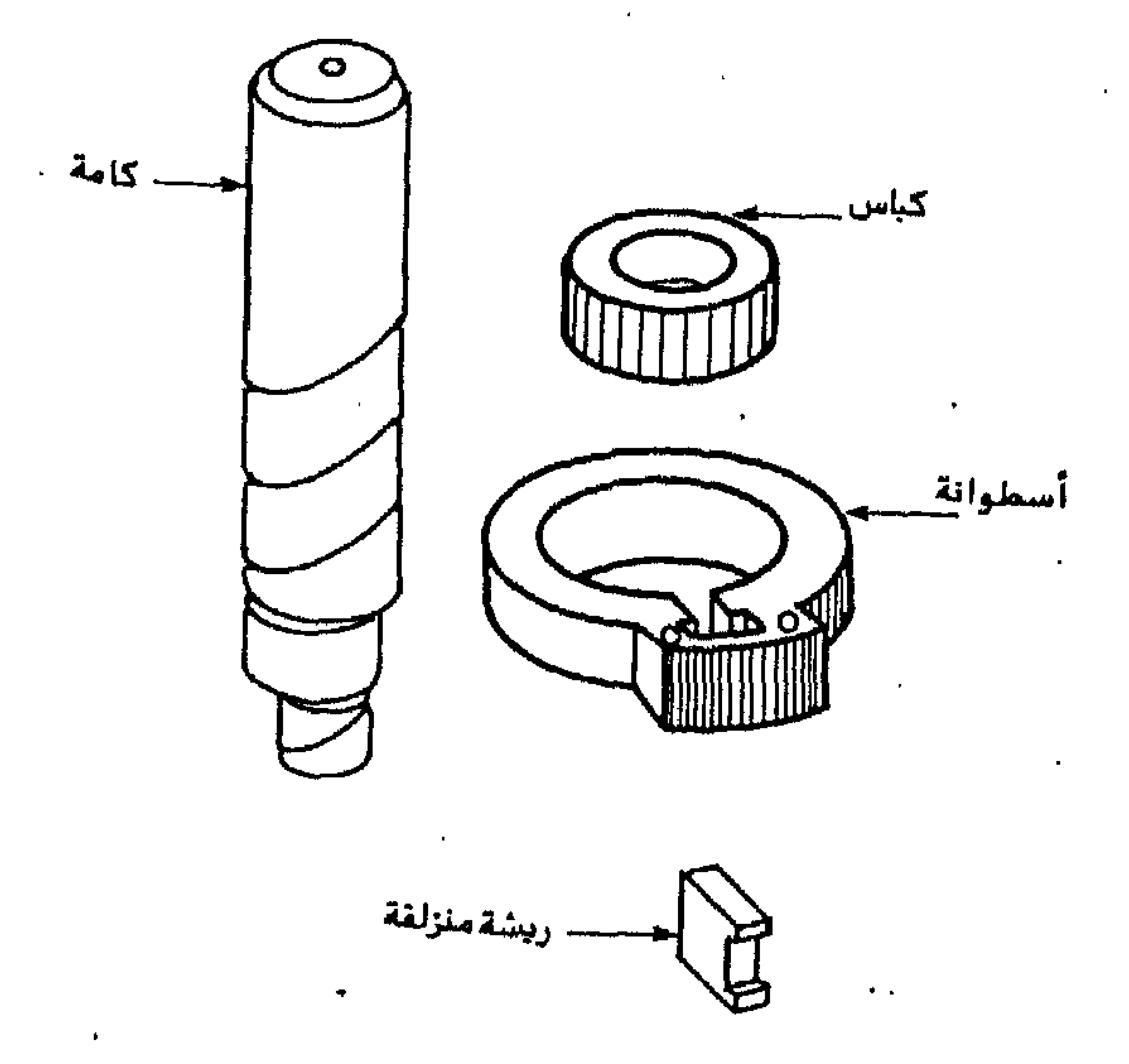
الضواغط الدورانية هي إحدى أقسام ضواغط الإزاحة الموجبة حيث تنتج هذه الإزاحة نتيجة حركة دورانية بدلاً من الحركة الترددية بالضواغط الترددية . تنقسم الضواغط الدورانية إلى قسمين أساسيين : الضواغط الدورانية أحادية الريشة ، والضواغط الدورانية متعددة الأرياش . ويعرف الضاغط الدوراني أحادي الريشة أيضاً باسم الضاغط الدوراني ثابت الريشة ، وأيضاً باسم الضاغط الدوراني ذي الكباس المتدحرج . وهذه الأسماء جميعها مرادفات لنفس النوع من الضواغط . ويبين شكل ٦.١ ضاغطاً دورانياً أحادي الريشة . كما يبين شكل ٦.٢ مكونات هذا الضاغط الأساسية . وكما هو مبين من الشكلين يتكون هذا النوع من الضواغط الدورانية من المكونات الآتية : أسطوانة خارجية ، وكباس حلقي ، وعمود إدارة متصل مباشرة بكامة ، وريشة منزلقة ، وصمام طرد . تمثل الأسطوانة الخارجية الجسم الخارجي للضاغط وتحوي بداخلها الكباس الحلقي وعمود الإدارة والكامة . أيضاً تضم هذه الأسطوانة ، داخل تجويف بها ، ريشة منزلقة تحت تأثير زنبرك يجعل طرف هذه الريشة دائم الارتكاز على سطح الكباس الحلقي عند نقطة أ كما هو مبين بشكل ٦.١ . ويوجد داخل الأسطوانة وعلى نفس محورها عمود





شكل ٦.١ ضاغط دوراني أحادي الريشة : فكرة التشغيل .

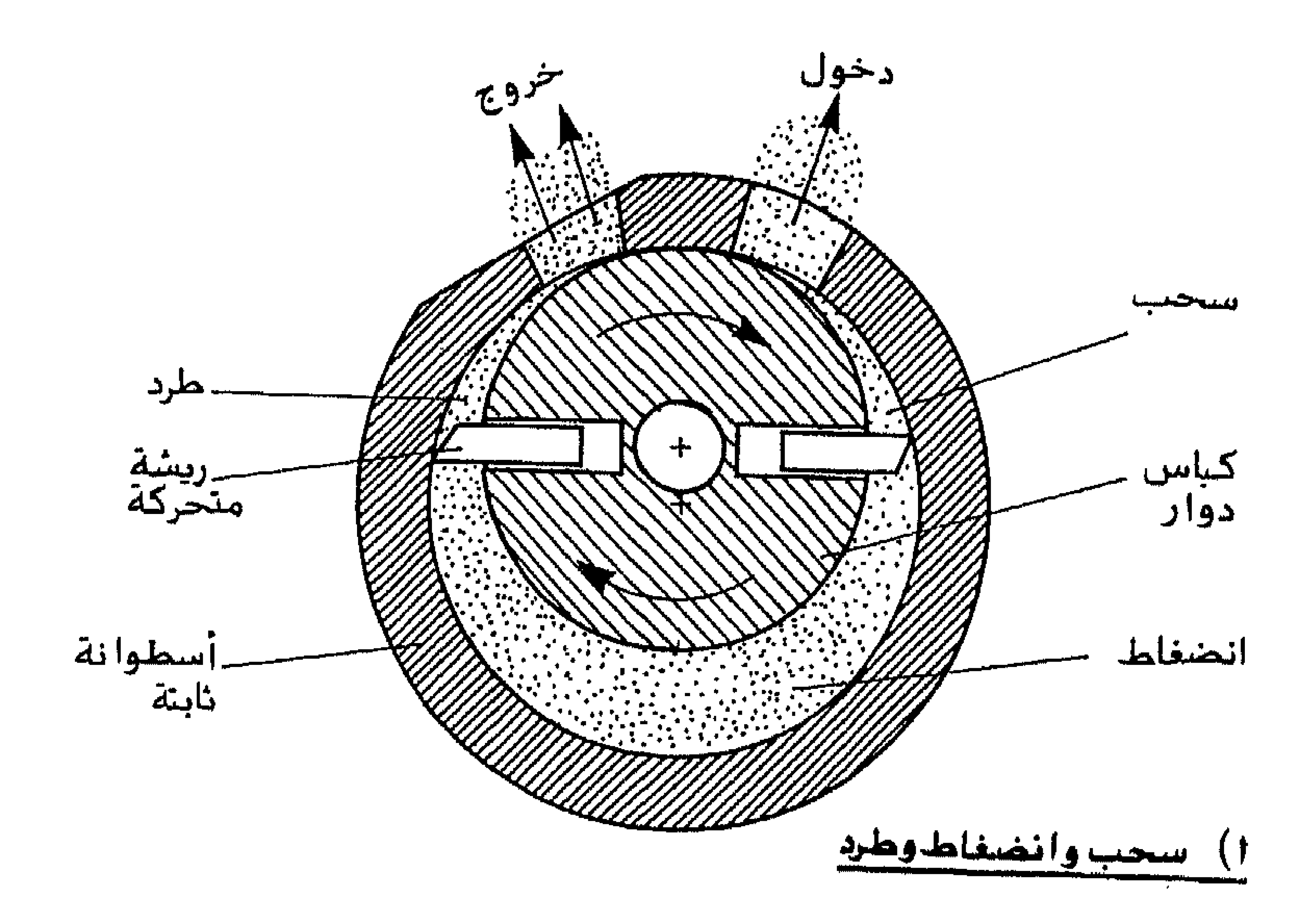
إدارة يتصل مباشرة بكامة لدحرجة الكباس الحلقي فوق هذه الكامة مما يسبب حركة الكباس داخل الأسطوانة الخارجية بحيث يلامس هذا الكباس سطح الأسطوانة الداخلية في نقطة ب . وينتج عن حركة الكباس في الاتجاه المبين بالرسم تقسيم الحيز الموجود بين الكباس والأسطوانة إلى جزئين : أحدهما يحوي بخار المبرد أثناء مشوار السحب ، والآخر

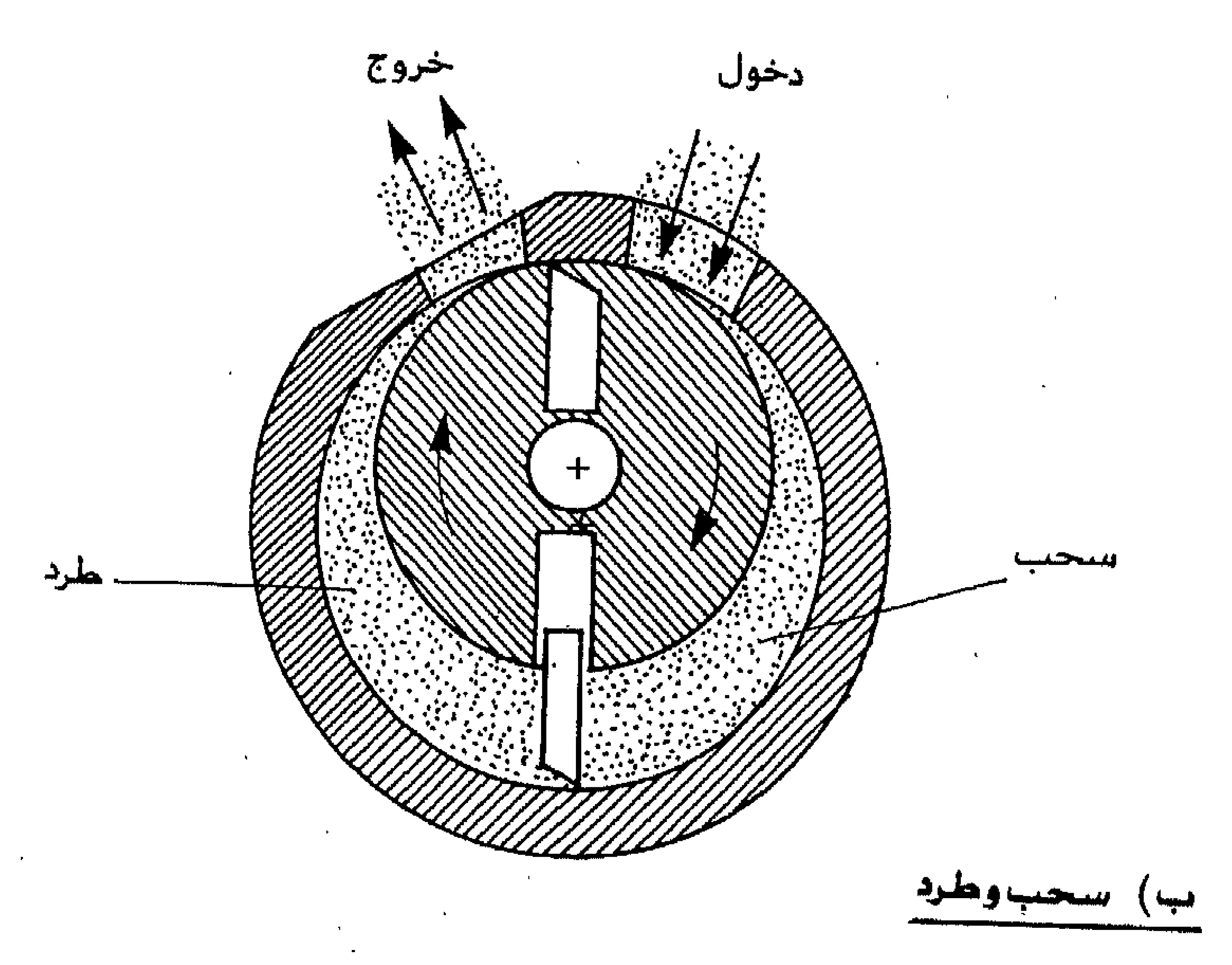


شكل ٦.٢ مكونات ضاغط دوراني أحادي الريشة .

يحوي بخار المبرد في مشوار الانضغاط أو الطرد . فبالإشارة إلى الحالة (أ) في شكل ٦.١ ، يتم سحب بخار المبرد في الحيز الأيمن بالرسم بينما يتم انضغاط البخار في الحيز الأيسر . وباستمرار حركة الكباس الحلقي ، يقل حجم البخار في الحيز الأيسر نتيجة الإزاحة الموجبة للكباس مما يعمل على رفع قيمة الضغط فإذا زاد هذا الضغط عن ضغط الطرد بخط الغاز الساخن فُتِحَ صمام الطرد ويبدأ مشوار الطرد كما هو موضح بالحالة (ب) بشكل ٦.١.

وتستخدم الضواغط الدورانية متعددة الأرياش أرياشاً مثبتة على سطح الكباس الحلقي ، وتسمى هذه الضواغط أيضاً بضواغط الأرياش الدواره ، بالمقارنة بالنوع السابق ضاغط الريشة الثابتة . ويبين شكل ٦.٣ ضاغطاً دورانياً ثنائي الريشة . ويدور الكباس الحلقي مباشرة بعمود إدارة دون استخدام كامة ، خلافاً للضواغط الدورانية أحادية الريشة، مع ترحيل محور دوران عمود الإدارة عن مركز الأسطوانة الخارجية .في الحالة (أ) من شكل ٦.٣ يقسم الحيز بين الكباس والأسطوانة إلى ٣ أجزاء : في الجزء الأيمن يتم





شكل ٦,٣ ضاغط دوراني ثنائي الريشة : فكرة التشغيل .

سحب بخار المبرد ، وفي الجزء الأوسط يتم انضغاط البخار نتيجة هندسة الحيز المحصور بين الكباس والأسطوانة الخارجية ، وفي الجزء الأيسر يتم طرد البخار عند ضغط الطرد . وتتم عملية الطرد فور مرور الريشة على فتحة الطرد كما هو موضح بالحالة ب في شكل

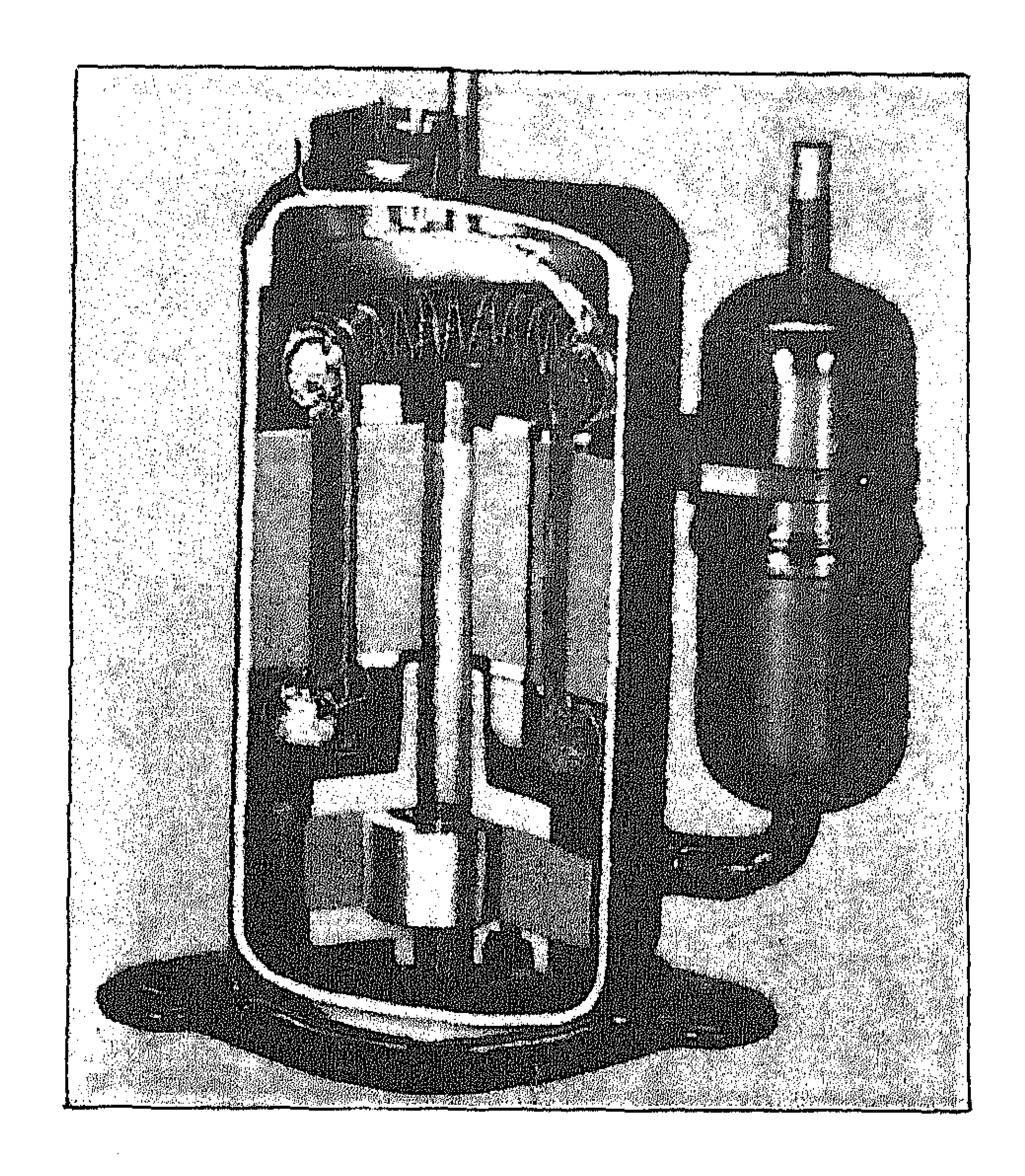
٦.٣ ، وعندئذ يقسم الحيز بين الأسطوانة والكباس إلى جزئين فقط : سحب البخار ، وطرد البخار . ويوضح شكل ٦.٤ قطاعاً توضيحياً بضاغط دوراني ثماني الأرياش . ويبين الرسم فتحات السحب والطرد بالأسطوانة الخارجية ، وعمود الإدارة ، والكباس الحلقي والأرياش المثبتة به .



شكل ٦.٤ مقطع في ضاغط دوراني ثماني الأرياش [التهاوس وآخرون ، ١٩٨٢] .

ولا يحتاج الضاغط الدوراني بنوعيه إلى صمام سحب ، وإنما يكون السحب مستمراً كما هو موضح بشكلي ٦.١ و ٦.٣ . ويفيد هذا في خفض الضوضاء الناشئة عن عملية السحب المتقطعة الموجودة في حالة الضاغط الترددي . أيضاً لا يحتاج الضاغط الدوراني متعدد الأرياش إلى صمام طرد ، أما الضاغط أحادي الريشة فيلزم تركيب صمام طرد له . وبالرجوع إلى شكل ٦.٣ يتضح من الشكل "ب" أن عملية الطرد تتم مباشرة فور مرور الريشة على فتحة الطرد مما يلغي الحاجة إلى صمام طرد . وينتج أيضاً عن استمرار عملية الطرد ، بدلاً من أن تكون متقطعة نتيجة وجود صمام طرد ، انخفاض الضوضاء في هذا النوع من الضواغط بالمقارنة بالضاغط الترددي . ويلاحظ أيضاً ضرورة تركيب صمام غير مُرجِع على خط الطرد أو خط السحب للضاغط الدوراني لمنع هجرة الغاز مرتفع الضغط بالمكثف إلى خط السحب أثناء توقف الضاغط . وبالرغم من فائدة هذه الهجرة لمعادلة الضغوط حول الكباس مما يقلل من عزم البداية ، إلا أن هذا التسرب يؤدي إلى إهدار لا داعي له بالطاقة نتيجة عودة غاز بضغط عالي إلى خط السحب منخفض الضغط . وبتركيب الصمام غير المرجع على خط الطرد يُمْنَع هجرة غاز المبرد من الضغط العالي إلى الضغط الواطي، وتتم أيضاً معادلة الضغوط حول الكباس عند الإيقاف ، مما يساعد على خفض عزم البداية .

وتقسم الضواغط الدورانية بنوعيها ، كما هو الحال في حالة الضواغط الترددية ، إلى ضواغط مفتوحة ، وضواغط مغلقة ، وضواغط نصف مغلقة . ففي القسم الأول يلزم وجود موتور خارجي لتشغيل الضاغط ، أما في القسم الثاني فيوضع الموتور والضاغط معاً في علبة حاوية محكمة الغلق بلحامات حيث يمكن فتحها للصيانة بالمصنع فقط ، ويشابه القسم الثالث ضواغط القسم الثاني إلا أن العبة الحاوية للضاغط والموتور تغلق باستخدام مسامير يمكن فكها بغرض الصيانة والإصلاح بالموقع . ويوضح شكل ٦.٥ مقطعاً في أحد الضواغط الدورانية محكمة الغلق .



شكل ٥ . ٦ مقطع في ضاغط دوراني محكم الغلق [توشيبا ، ١٩٩٠] .

وتمتاز الضواغط الدورانية بصغر حجمها وخفة وزنها بالمقارنة بالضواغط الترددية التي لها نفس سعة التبريد ، حيث تعمل الضواغط الدورانية بسرعة دوران أكبر من المستخدمة بالضواغط الترددية . كما تمتاز الضواغط الدورانية أيضاً بقلة عدد الأجزاء المتحركة بها (حوالي ٤ أجزاء) بالمقارنة بعدد الأجزاء المتحركة بالضواغط الترددية (حوالي ١١ جزء) ، مما يؤدي إلى انخفاض الضوضاء الصادرة من الضاغط الدوراني بالمقارنة بالضاغط الترددي . أضف إلى هذا فإن هذه الضواغط تتفوق في كفاءتها الحجمية على الضواغط الترددية حيث يمكن تصنيع الأولى بنسبة حيز خلوص أقل من الممكن أن تصنع به الثانية .

وتستخدم الضواغط الدورانية الصغيرة حتى ٥ كيلووات بكثرة في العديد من

التطبيقات مثل الثلاجات المنزلية ، والمجمدات المنزلية ، ووحدات تكييف هواء الشباك . أما الضواغط الدورانية الكبيرة فتستخدم كضواغط مُعْزّزة في مرحلة الضغط المنخفض بنظم التبريد متعددة المراحل حيث تحتاج المرحلة منخفضة الضغط إلى مناولة معدل كبير من الحجم بنسبة انضغاط منخفضة (لا تزيد عادة عن ١:٧) مما يؤهل هذا النوع من الضواغط لهذه الوظيفة لتفوقه في الأداء على الضواغط الترددية لنفس الغرض .

٦.٣ اداء الضواغط الدورانية

نظراً لأن الضواغط الدورانية هي ضواغط موجبة الإزاحة مثل الضواغط الترددية فإن أداء الضواغط الدورانية يخضع لنفس العلاقات الرياضية التي قدمت سابقاً لأداء الضواغط الترددية ، وهي العلاقات الرياضية الخاصة بحساب الكفاءة الحجمية (معادلة ٥.٧) ، وحساب معدل سريان مائع التبريد الذي يناوله الضاغط (معادلة ٥.٩) ومعادلة حساب القدرة اللازمة للانضغاط (معادلة ٥.١٠ أو معادلة ٥.١٢) ، فقط تختلف المعادلة الرياضية لحساب إزاحة الكباس بالضاغط الدوراني عنها بالضاغط الترددي ، نظراً للشكل الهندسي وطريقة العمل بكل منهما . ويمكن رياضياً التعبير عن إزاحة الكباس النظرية بالضاغط الدوراني أحادي الريشة (ثابت الريشة) كما يلي (انظر شكل ٦.١)

$$\overline{PD} = \frac{\pi}{4} \left(D^2 - d^2 \right) L \frac{N}{60} \tag{6.1}$$

حيث D و d هما على التوالي القطر الداخلي للأسطوانة وقطر الكباس الحلقي و L هي طول الكباس و N هي سرعة دوران عمود الإدارة (لفة/دقيقة) . ويمكن بالتقريب التعبير عن إزاحة الكباس النظرية لضاغط دوراني به N_V ريشة سمك كل منها t كما يلي (انظر شكل ٦.٢)

$$\overline{PD} = (D-d)L\ \frac{N}{60}\left\{\frac{\pi}{4}(D+d)-\frac{t}{2}N_V\right\} \tag{6.2}$$

وباستخدام معادلة (٥.٥) تعطي إزاحة الكباس الفعلية عندئذ بدلالة نسبة ضغط الطرد إلى ضغط السحب كما يلي

$$\overline{PD_a} = \overline{PD}\ [1 + C - C\ r_p^{1/n}] \tag{6.3}$$

حيث C هي نسبة حجم الخلوص بالضاغط إلى إزاحة الكباس النظرية كما قدمنا سابقاً في الفصل الخامس ، و n وهي المؤشر البوليتروبي لعملية الانضغاط . فإذا كانت عملية الانضغاط تبدأ بالحالة ١ وتنتهي بالحالة ٢ وتتم تبعاً لعملية بوليتروبية عكسية فإن الكفاءة الحجمية للضاغط تعطى بالمعادلة (٥.٧) كما يلي

$$\eta_V = (1 + C - C\ r_p^{1/n}) \tag{6.4}$$

حيث تم مساواة الحجم النوعي v_1 خارج الضاغط بالحجم النوعي v_b داخل الضاغط أثناء عملية السحب نظراً لأن الضاغط الدوراني لا يحوي صمام سحب . ويقدر معدل الكتلة التي يناولها الضاغط بالمعادلة (٥.٩) كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1}\ \overline{PD}\ h_V \tag{6.5}$$

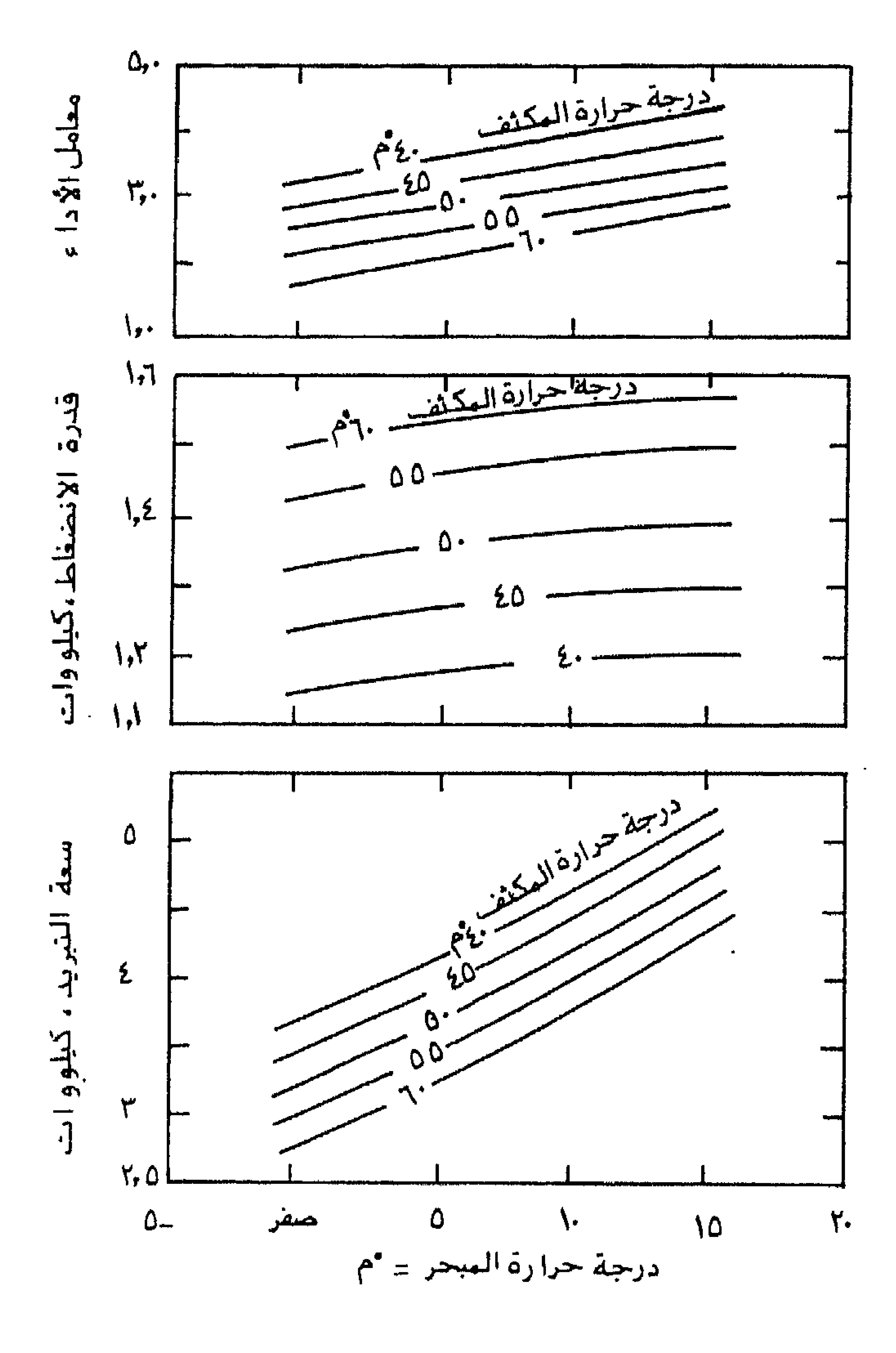
وتعطى القدرة اللازمة للضاغط بالمعادلة (٥.١٠) كما يلي

$$\dot{W} = \dot{m}\ (h_1 - h_2) \tag{6.6}$$

إذا فُرِضَ أن عملية الانضغاط أيزنتروبية ، حيث h_1 و h_2 هما إنثالبي بخار المبرد بخط السحب والطرد على التوالي ، أو بالعلاقة التالية (معادلة ٥.١٢)

$$\dot{W} = \dot{m} \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[r_p^{(n-1)/n} - 1 \right] \qquad (6.7)$$

إذا فُرِضَ أن عملية الانضغاط بوليتروبية . لاحظ أن المؤشر n يمكن استبداله بالمؤشر الأيزنتروبي γ إذا كانت عملية الانضغاط أيزنتروبية ، وفرض أن بخار المبرد أثناء عملية الانضغاط كان غازاً مثالياً . وتعطى قيمة γ للمبردات المختلفة بشكل (٥ . ٥) .



شكل ٦ . ٦ منحنيات أداء ضاغط دوراني متعدد الأرياش . سرعة الدوران ٣٥٠٠ لفة/دقيقة ، ودرجة حرارة الجو المحيط = ٣٢° م ، [أشراي ، ١٩٨٨]

ويوضح شكل ٦.٦ منحنيات أداء ضاغط دوراني متعدد الأرياش . وتعطي هذه المنحنيات تغير سعة التبريد ، وقدرة الانضغاط ، ومعامل الأداء لدورة التبريد مع درجتي حرارة التشبع بالمكثف والمبخر . وبمقارنة هذه المنحنيات بمثيلتها في شكل ٥.١٠ يتضح تماثل اتجاهات التغير في قيم سعة التبريد وقدرة الانضغاط مع درجتي حرارة التشبع بالمكثف والمبخر للضواغط الدورانية والضواغط الترددية .

مثال ٦.١

ضاغط دوراني رباعي الأرياش ، قطر كباس التدحرج به يساوي ٩٢ مم والقطر الداخلي لأسطوانته يساوي ١٢٠ مم و بطول ٩٠ مم للكباس ، يدور بسرعة دوران قدرها ٣٥٠٠ لفة/دقيقة ، وسمك كل ريشة به حوالي ٢ مم ، ويعمل الضاغط بمبرد ٢٢ بين درجتي حرارة مبخر ومكثف -١٠° م و ٥٠° م على التوالي . إذا كانت نسبة حجم الخلوص هي ١٪ ، احسب الآتي :

أ) حجم الإزاحة النظري للضاغط

ب) حجم الإزاحة الفعلي للضاغط

جـ) الكفاءة الحجمية للضاغط

د) قدرة تشغيل الضاغط

هـ) سعة تبريد الضاغط

و) معامل أداء دورة التبريد البسيطة التي يمكنها استخدام الضاغط .

افرض عملية انضغاط أيزنتروبية .

الحل

أ) باستخدام معادلة ٦.٢ تحسب إزاحة الكباس النظرية كما يلي :

$$\overline{PD} = (0.120 - 0.092) \times 0.09 \times \frac{3500}{60} \times [\, \frac{\pi}{4} (0.120 + 0.092) - \frac{0.002}{2} \times 4 \,]$$

$$= 0.0239 \quad m^3/s$$

ب) من ملحق أ نجد أن ضغط الطرد = ١٩٤٣,٢ كيلوبسكال وضغط السحب = ٣٥٤,٧ كيلوبسكال لمبرد ٢٢ . وبفرض عملية انضغاط أيزونتروبية فإن شكل ٥.٥ يعطي γ = ١,١٢ . وباستخدام معادلة ٦,٣ نجد أن

$$\overline{PD_a} = 0.0239 \left[1 + 0.01 - 0.01 \left(\frac{1943.2}{354.7} \right)^{1/1.12} \right] = 0.023 \quad m^3/s$$

جـ) تعطي الكفاءة الحجمية للضاغط كما يلي

$$\eta_V = 1 + 0.01 - 0.01 \left(\frac{1943.2}{354.7} \right)^{1/1.12} = 0.964$$

د) من ملحق أ نجد أن v_1 = ٠,٠٦٥١٣ م^٣/كجم ، ومن معادلة ٦,٥ يقدر معدل الكتلة التي يناولها الضاغط كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{0.06513} \times 0.0239 \times 0.964 = 0.353 \quad kg/s$$

عندئذ تحسب قدرة التشغيل من معادلة ٦,٧ بعد استبدال قيمة n بقيمة γ كما يلي

$$\dot{W} = 0.353 \times \frac{1.12}{1.12 - 1} \times 354.7 \times 0.06513 \left[\left(\frac{1943.2}{354.7} \right)^{0.12/1.12} - 1 \right]$$

$$= 15.21 \quad kW$$

هـ) باستخدام دورة التبريد البسيطة المعطاه بشكل ٥,٩ ، وملحق أ نجد أن h_1 = ٤٠٠,٨٣ كيلوجول/كجم °م و h_3 = ٢٦٣,٠٢ كيلوجول/كجم °م ، وتعطى سعة التبريد عندئذ كما يلي

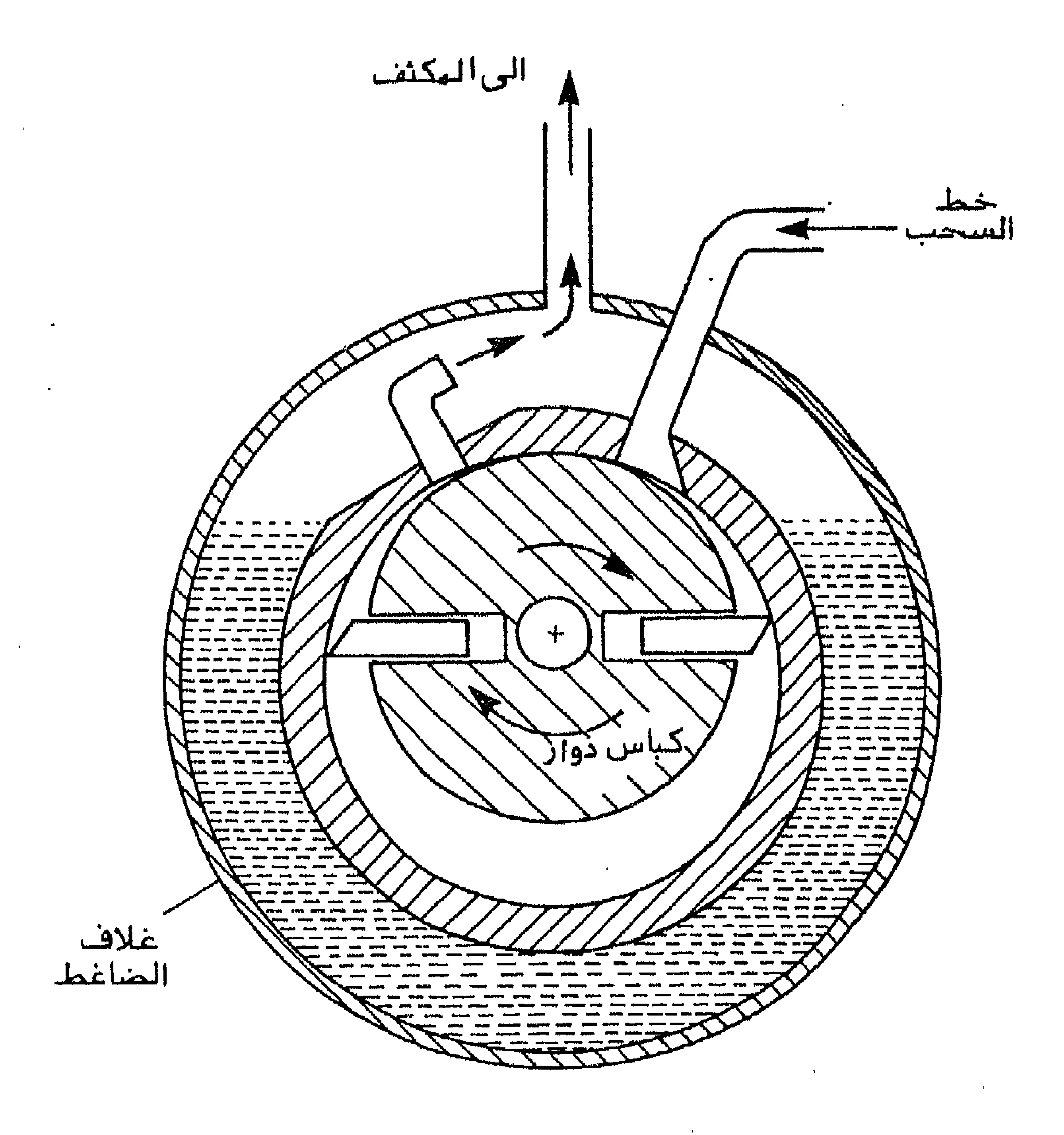
$$\dot{Z} = 0.353 \; (400.83 - 263.02) = 48.65 \quad kW$$

و) يقدر معامل أداء دورة التبريد كما يلي

$$COP = \frac{48.65}{15.21} = 3.2$$

٦.٤ تزييت الضواغط الدورانية

يتطلب الضاغط الدوراني بنوعيه تزيتاً لأسطح الحركة به مثل المحامل ، وتجاويف الأرياش ، وأطراف الأرياش . كما يعمل زيت التزييت أيضاً على منع تسرب بخار المبرد من



شكل ٦.٧ رسم تخطيطي لضاغط دوراني يحوي زيت تزييت في غلافه الخارجي .

الضغط العالي إلى الضغط الواطي خلال طرف الريشة ، حيث يُكَوّن الزيت طبقة رقيقة عند أطراف الأرياش الدواره أثناء تشغيل الضاغط . وبإيقاف الضاغط تتكسر طبقة الزيت هذه مما يسمح بتعادل الضغوط عبر طرفي الأرياش .

ويوضع مستودع زيت التزييت بالضواغط الصغيرة عادة في الغلاف الخارجي للضاغط كما هو مبين بشكل ٦.٧ ، ويعمل الضاغط عندئذ على طرد البخار المضغوط إلى الفراغ الموجود فوق سطح التزييت ، وبالتالي يُحْفَظ الزيت عند ضغط الطرد للضاغط ، العالي نسبياً ، مما يساعد على سريان هذا الزيت عبر فتحات التزييت المختلفة إلى الأسطح المطلوب تزيتها . أما الضواغط الكبيرة نسبياً فتستخدم مضخة ترسية أو مضخة طرد مركزي ، تدار مباشرة بواسطة عمود إدارة الضاغط ، ويحفظ زيت التزييت في هذه الحالة في خزان خارجي منفصل .

٦.٥ التحكم في سعة تبريد الضواغط الدورانية

يتم التحكم في سعة تبريد الضواغط الدورانية عادة إما بالتحكم في سرعة دوران الضاغط ، أو بتجنيب جزء من البخار المرور خلال أرياش الضاغط لانضغاطه ، وإعادة هذا البخار إلى خط السحب مره أخرى .

وفي طريقة التحكم في سرعة دوران الضاغط تتغير سعة التبريد طردياً مع سرعة الدوران نظراً لتغير إزاحة الضاغط طردياً مع سرعة الدوران أيضاً . فباستخدام معادلة ٦.٥ وكذلك معادلة ٦.٢ ينتج أن

$$\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (6.8)$$

حيث $\dot{Z}_1$ و $\dot{Z}_2$ هما سعتا التبريد المناظرتان لسرعتي الدوران N_1 و N_2 على التوالي . ولمزيد من التفصيل حول هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى الجزء ٢.٩.٥ من الفصل الخامس.

مثال ٦.٢

في المثال السابق احسب سرعة دوران الضاغط حتى تقل سعة التبريد إلى ٣٥ كيلووات . أيضاً احسب قدرة تشغيل الضاغط عند السرعة الجديدة .

الحل

من معطيات مثال ٦.١ والمثال الحالي ، وباستخدام معادلة ٦.٨ نجد أن

$$N_2 = \frac{35}{48.65} \times 3500 = 2518 \quad \text{rpm}$$

ويعطى معدل السريان عندئذ من المعادلة ٦.٥ والمعادلة ٦.٢ كما يلي

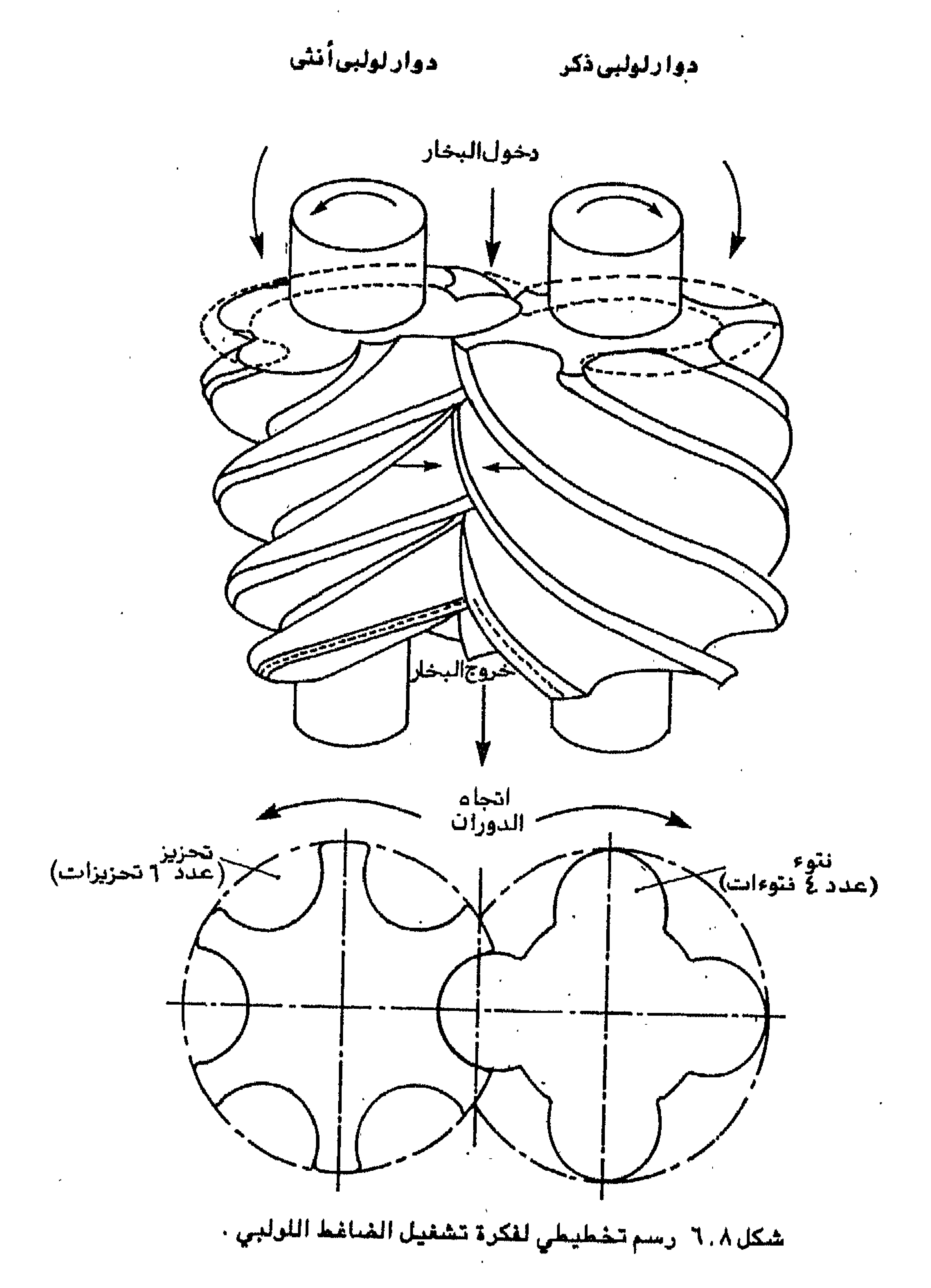
$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \frac{N_2}{N_1} = 0.353 \times \frac{2518}{3500} = 0.254 \quad \text{kg/s}$$

وتعطى قدرة التشغيل كما يلي

$$\dot{W}_2 = \dot{W}_1 \frac{N_2}{N_1} = 15.21 \times \frac{2518}{3500} = 10.94 \quad \text{kW}$$

٦.٦ الضواغط اللولبية

الضواغط اللولبية هي ضواغط موجبة الإزاحة كما بينا سابقاً ، وهي تعتبر أيضاً ضواغط دورانية من حيث التقسيم العام للضواغط . دخلت الضواغط اللولبية صناعة التبريد وتكييف الهواء بعد عام ١٩٦٠ . ومنذ ذلك التاريخ تطورت صناعة هذه الضواغط

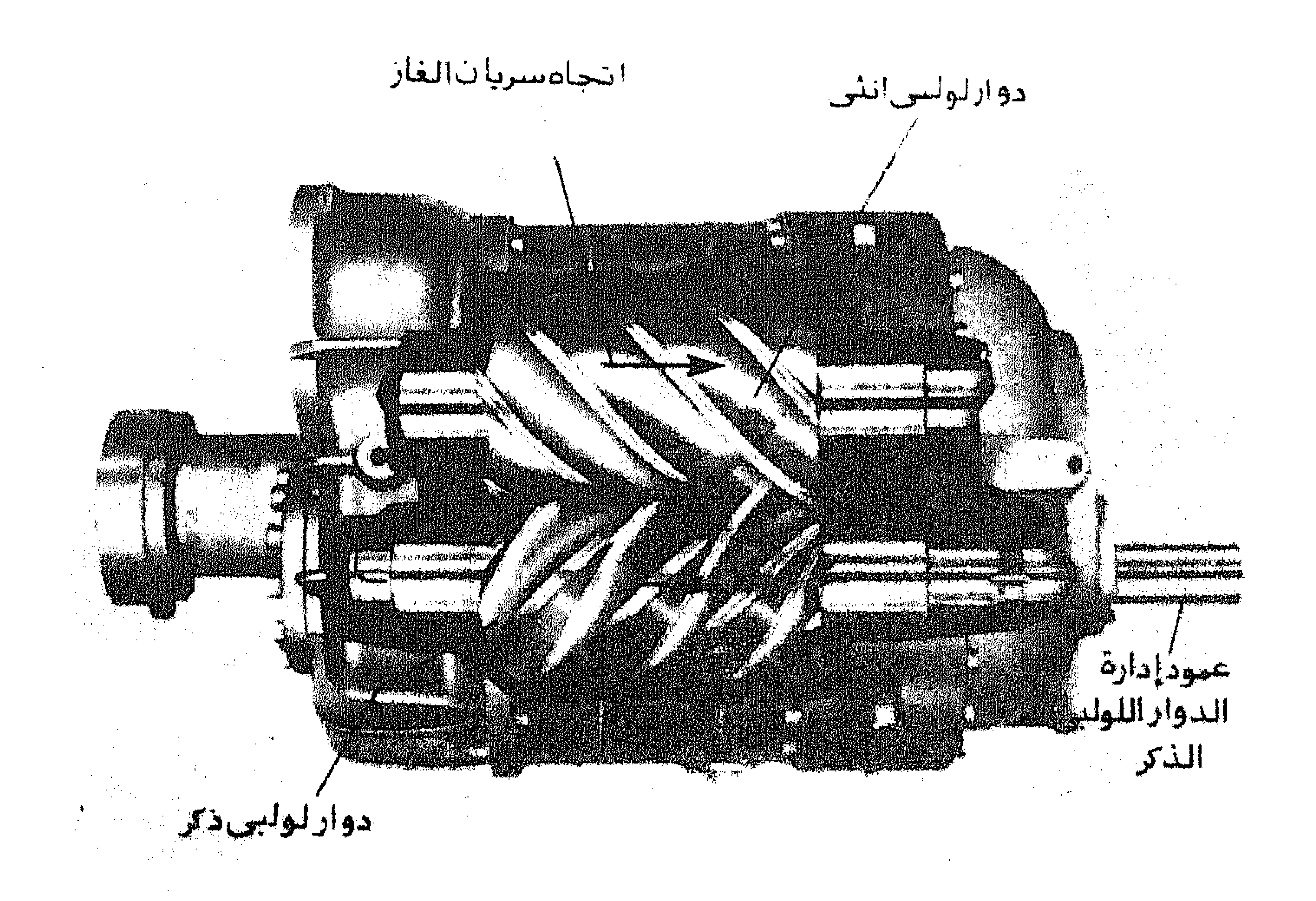


شكل ٦.٨ رسم تخطيطي لفكرة تشغيل الضاغط اللولبي .

تطوراً كبيراً وشهدت العديد من التغيرات في تصميمها . وتمتاز هذه الضواغط بالسهولة في التصميم والتشغيل وقوة تحملها وطول عمرها وصغر حجمها وارتفاع كفاءتها بالمقارنة بالضواغط الترددية . وتتوفر الضواغط اللولبية بسعات تبريد أكبر من ٧٠ كيلووات (حوالي ٢٠ طن تبريد) وحتى ٦٤٠٠ كيلووات (حوالي ١٣٠٠ طن تبريد) ، مما يعني أن هذه

الضواغط لم تستخدم حتى الآن في التطبيقات الصغيرة ، مثل الثلاجات والمجمدات المنزلية ، ووحدات الشباك لتكييف الهواء . وتعمل الضواغط اللولبية بنسبة انضغاط (نسبة ضغط الطرد إلى ضغط السحب) مرتفعة نسبياً تصل إلى حوالي ١:٢٥ مما يؤهلها للاستخدام كمرحلة واحدة بنظم التبريد منخفضة درجة الحرارة ، بدلاً من استخدام مرحلتين أو أكثر من الضواغط .

يتكون الضاغط اللولبي من المكونات الأساسية الآتية : دوار لولبي ذكر ، ودوار لولبي أنثى ، وأسطوانة حاوية للدوارين ، ووصلة سحب بخار المبرد إلى الضاغط ، ووصلة طرد بخار المبرد إلى خط الطرد ، وذلك بالإضافة إلى أجهزة الأمان والتحكم الأخرى . ويبين شكل ٦.٨ رسماً تخطيطياً لأحد هذه الضواغط مبيناً مكوناته . كذلك يبين شكل ٦.٩ مقطعاً



شكل ٦.٩ مقطع في ضاغط لولبي مبيناً اتجاه السريان [بيتا ، ١٩٨٤] .

توضيحياً لواحد من هذه الضواغط من النوع المفتوح . وكما هو مبين بشكل ٦.٨ يتكون الدوار اللولبي الذكر من عمود أسطواني به نتوءات مستديرة حلزونية ، أما الدوار اللولبي الأنثى فهو عبارة عن عمود أسطواني به تجاويف (أو تحازيز) مستديرة حلزونية ، وبدوران الدوار الذكر يتم تعشيق نتوءاته في تجاويف الدوار الأنثى مسبباً دورانه هو الآخر . وكما هو مبين بالشكل يدخل بخار المبرد من وصلة السحب ويملأ الفراغات بين الدوارين والأسطوانة الخارجية ، وبدوران الدوار الذكر ومن ثم دوران الدوار الأنثى ، يزاح بخار المبرد بين الدوارين والأسطوانة إلى الأمام حيث يقل الحجم مما يسبب انضغاط بخار المبرد . وينتقل بخار المبرد تدريجياً في اتجاه وصلة الطرد حيث يدفع إلى خارج هذه الوصلة عند ضغط الطرد . وتصمم الضواغط الدورانية باختلاف عدد النتوءات بالدوار الذكر عن عدد التجاويف (التحزيزات) بالدوار الأنثى وهي عادة ٤ في الأول و ٦ في الثاني.

ويتضح من فكرة تشغيل الضاغط اللولبي أن هذا الضاغط له نسبة انضغاط ثابتة تعتمد على نسبة التغير في الحجم بين السحب والطرد بالضاغط . كما يتضح أيضاً أن عملية السحب والطرد هنا تتم بطريقة مستمرة وليس بطريقة متقطعة كما هو الحال في الضاغط الترددي ، مما يساعد على خفض الاهتزاز والضوضاء بالضاغط اللولبي بالمقارنة بالضاغط الترددي .

٦.٧ حساب إزاحة كباس الضاغط اللولبي وكفاءته الحجمية

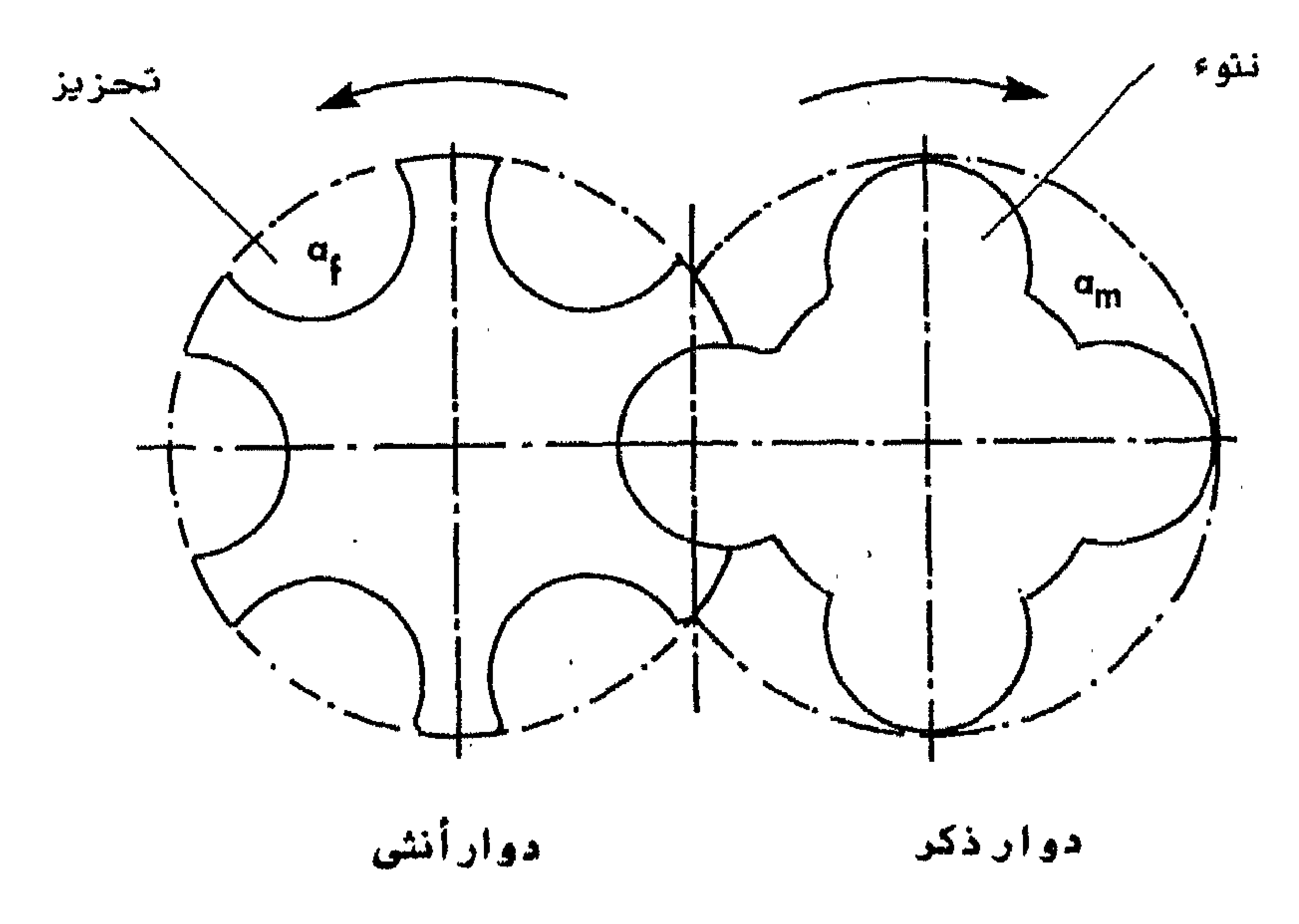
يُدْرَس أداء الضواغط اللولبية بنفس الطريقة التي يُدْرَس بها أداء الضواغط الترددية ، والمعطاه بالفصل السابق . ويلزم لدراسة الضواغط اللولبية أن يحدد أولاً إزاحة الكباس بالضاغط وكفاءته الحجميه . عندئذ يمكن حساب تغير سعة تبريد الضاغط وقدرة الانضغاط اللازمة له بتغير ظروف التشغيل المختلفة مثل درجتي حرارة التشبع بالمبخر

والمكثف .

وبفرض أن الدوارين الذكر والأنثى يعملان معاً ككباس ، فإن إزاحة الكباس تقدر عندئذ بمعدل الحجم الذي يزيحه الكباس من ضغط السحب إلى ضغط الطرد ، مقاساً عند ضغط السحب . فإذا كان عدد النتوءات بالدوار الذكر هو ٤ وكان يدور بسرعة N ، وكان عدد التجويفات بالدوار الأنثى ٦ فإن سرعة دورانه تصبح ثلثي القيمة N . وبأخذ مقطع الضاغط عند وصلة السحب به وقبل بدء عملية انضغاط البخار ، فإن مساحة المقطع المملوء بالبخار بين أي نتوئين بالدوار الذكر وسطح الأسطوانة الحاوية هو a_m وكذلك مساحة المقطع المملوء بالبخار بين أي تجويف بالدوار الأنثى وسطح الأسطوانة الحاوية هو a_f كما هو مبين بشكل ٦.١٠ . عندئذ تعطى إزاحة الكباس النظرية كما يلي

$$\overline{PD} = L\,(\,4a_m\,N + 6a_f \;.\; \frac{2}{3}\,N\,) \tag{6.9}$$

حيث L هي طول أي من الدوارين . وتؤول العلاقة السابقة إلى الآتي



شكل ٦.١٠ مساحة مقطع الضاغط المملوءه بالبخار قبل بدء عملية الانضغاط .

$$\overline{PD} = 4L\,N\;(a_m + a_f) \tag{6.10}$$

فإذا كان قطر أي من الدوارين (نفس القطر لكل منهما) هو D فإن إزاحة الكباس تصبح

$$\overline{PD} = K\frac{\pi}{4}D^2\,L\,N \tag{6.11}$$

حيث K معامل يعطى كما يلي

$$K = \frac{4\,(a_m + a_f)}{\pi/4\;D^2} \tag{6.12}$$

وهي تمثل النسبة بين مساحة المقطع بالضاغط اللولبي المملوءه بالبخار قبل عملية الانضغاط إلى هذه المساحة بضاغط ترددي له نفس قطر الكباس D . وتكتب المعادلة ٦.١١ بالصورة الآتية

$$\overline{PD} = K\,\overline{PD}_r \tag{6.13}$$

حيث $\overline{PD}_r$ هي إزاحة الكباس بضاغط ترددي له نفس القطر D ونفس طول المشوار L ونفس سرعة الدوارن N . ويأخذ المعامل K عادة القيمة ٦٢,. للضواغط المصممة بدوّارات متماثلة ، كالمبين بشكل ٦.٩ .

وتُعرّف الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي بنفس التعريف المستخدم في الضاغط الترددي أي بمعادلة ٥.٦ أو معادلة ٥.٧ . وعليه تعطى الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي كما يلي

$$\eta_V = \frac{v_1}{v_b}\,(1 + C - C\,r_p^{1/n}) \tag{6.14}$$

حيث v_1 و v_b هما الحجم النوعي خارج وصلة السحب وداخل الضاغط قبل عملية السحب ، على التوالي . وتعرف C في المعادلة السابقة بأنها نسبة حجم الخلوص في نهاية عملية

الانضغاط إلى إزاحة الكباس بالضاغط ، وتعرف n بأنها المعامل البوليتروبي لعملية الانضغاط . ونلاحظ الآن أن قيمة V_1 تساوي تقريباً V_b لانخفاض قيمة فقد الضغط في وصلة السحب بالضاغط اللولبي بالمقارنة بهذا الفقد في الضاغط الترددي . أيضاً تتضاءل قيمة C بالضاغط اللولبي بالمقارنة بالضاغط الترددي ، ولهذا السبب تكون الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي أعلى بكثير منها للضاغط الترددي ، ولا تنخفض هذه الكفاءة كثيراً ، كما هو الحال بالضاغط الترددي ، بارتفاع نسبة الانضغاط r_b بالضاغط (مرة أخرى لصغر قيمة C) .

أيضاً يقدر معدل الكتلة $\dot{m}$ التي يناولها الضاغط من معادلة مماثلة للمعادلة ٥.٩ في حالة الضاغط الترددي ، أو المعادلة ٦.٥ في حالة الضواغط الدورانية ، أي أن

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1} \overline{PD} \; h_v \tag{6.15}$$

٦.٨ القدرة اللازمة للانضغاط بالضواغط اللولبية

تعمل الضواغط اللولبية بنسبة انضغاط ثابتة ، فإذا كانت عملية الانضغاط بوليتروبية بمؤشر n ، وكان حجم البخار المسحوب V_s أو $\overline{PD}$ تبعاً لتعريف إزاحة الكباس لضاغط لولبي ، وضغطه P_s وكان الحجم في نهاية عملية الانضغاط V_d ، فإن ضغط الطرد داخل الضاغط يكون عندئذ كما يلي

$$\frac{P_d}{P_s} = \left(\frac{V_s}{V_d}\right)^n = (\phi)^n \tag{6.16}$$

حيث ϕ هي نسبة الحجم عند بداية عملية الانضاغط إلى الحجم عند نهاية العملية . وتحسب

القدرة اللازمة للانضغاط بنفس الطريقة المعطاه بالفصل الخامس ، ويكون لهذه القدرة القيمة المعطاه بالمعادلة ٥.١٢ ، أي أن

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_s \overline{PD} \; [(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1] \tag{6.17}$$

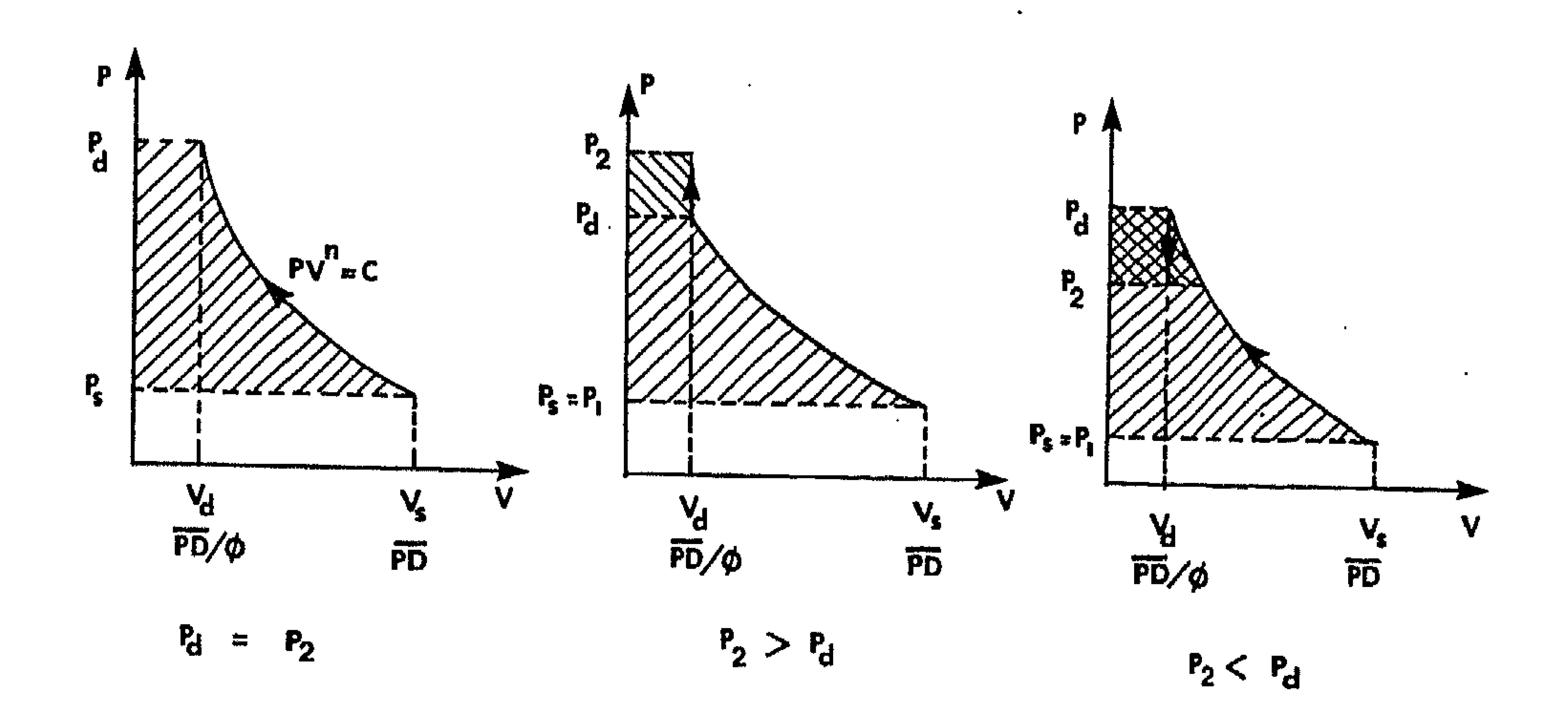
حيث r_p هي نسبة انضغاط الضاغط ، أي النسبة بين P_d و P_s . فإذا كانت العملية أيزنتروبية ، يستخدم المؤشر الأيزنتروبي γ من شكل ٥.٥ بدلاً من المؤشر البوليتروبي n في العلاقة السابقة . ويعتمد ضغط السحب بالضاغط P_s على ضغط المبخر P_1 ، حيث يتساوي الضغطان في القيمة . أما ضغط الطرد من الضاغط P_d فيعتمد أساساً على نسبة الحجمين في بداية ونهاية عملية الانضغاط ، وهي تعتمد بدورها على الأبعاد الهندسية للضاغط وطريقة تصميمه ، وقد يختلف هذا الضغط بالتالي عن الضغط بخط الطرد خارج الضاغط والمساوي لضغط المكثف P_2 تبعاً لظروف تشغيل نظام التبريد . وهذا الاختلاف بين P_d و P_2 يؤثر على قيمة القدرة $\dot{W}$ ، والمعطاه سابقاً في حالة تساوي P_d و P_2 فقط . فمن الشكل ٦.١١ إذا كانت قيمة P_d أقل من P_2 فإن القدرة الإضافية اللازمة لرفع الضغط من P_d إلى P_2 تعطى كما يلي

$$\Delta \dot{W} = \int_{P_d}^{P_2} V_d \; dP = \frac{\overline{PD}}{\phi} \; (P_2 - P_d) \tag{6.18A}$$

أما إذا زاد الضغط P_d عن الضغط P_2 فإن القدرة اللازمة للانضغاط يجب أن تزيد عندئذ بالمقدار الآتي

$$\Delta \dot{W} = \int_{P_d}^{P_2} V_d \; dP = \frac{\overline{PD}}{\phi} \; (P_d - P_2) \tag{6.18B}$$

لاحظ أن القيمة السابقة للقدرة $\Delta \dot{W}$ سالبة مما يعني انخفاض قيمة القدرة الإجمالية



شكل ٦.١١ القدرة اللازمة لانضغاط بخار المبرد بين ضغط مبخر P_1 وضغط مكثف P_2 .

وعليه تكون القدرة اللازمة للانضغاط عند أي قيمة لضغط الطرد P_d كما يلي

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_s \, \overline{PD} \, [r_p^{\frac{n-1}{n}} - 1] + \frac{\overline{PD}}{\phi} (P_2 - P_d) \tag{6.19}$$

وبالتعويض بقيمة ϕ من معادلة ٦.١٦ تكتب المعادلة السابقة كما يلي

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_1 \, \overline{PD} \, [\phi^{n-1} - 1] + \phi^{n-1} \, [\frac{P_2 / P_1}{\phi^n} - 1] \tag{6.20}$$

وتقدر الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط بدلالة القدرة السابقة كما يلي

$$\eta_{isent} = \frac{\dot{m} \, (h_2 - h_1)}{\dot{W}} \tag{6.21}$$

حيث h_1 و h_2 هي أنثالبي البخار خارج الضاغط بخط السحب والطرد على التوالي لعملية انضغاط أيزنتروبية بين حالة الدخول قبل الضاغط وحالة الخروج بعد الضاغط ،

و $\dot{m}$ هي معدل سريان بخار المبرد الذي يناوله الضاغط . ويمكن استبدال قدرة الانضغاط للعملية الأيزنتروبية المُعَرّفه في العلاقة السابقة ، بالقدرة المحسوبة من معادلة ٦.٦ لنسبة انضغاط من P_1 إلى P_2 وبمؤشر أيزنتروبي γ بدلاً من n ، أي أن

$$\eta_{isen} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]}{\frac{n}{n-1}\left[\phi^{(n-1)} - 1\right] + \phi^{n-1}\left[\frac{P_2/P_1}{\phi^{n}} - 1\right]} \tag{6.22}$$

مثال ٦.٣

يعمل ضاغط لولبي ثنائي القلووظ بين درجتي حرارة مبخر ومكثف قدرهما -٣٠°م و ٥٠° م على التوالى ، مستخدماً مبرد ٢٢ ، وبالمواصفات الآتية : قطر دوار قدره ١٥ سم ، وطول مشوار قدره ١٢ سم ، وسرعة دوران قدرها ٣٥٠٠ لفة/دقيقة ، ومعامل نسبة مساحة مقطع K قدره ٠.٦ ، ونسبة حجم خلوص قدرها ٠.٠١ ، ونسبة حجم في بداية الانضغاط إلى الحجم في نهاية الانضغاط قدرها ٥ . افرض عملية انضغاط بوليتروبية بمؤشر n قدره ١.٢٠ ، احسب الآتي :

أ) إزاحة الكباس للضاغط

ب) الكفاءة الحجمية للضاغط

جـ) قدرة التشغيل

د) الكفاءة الأيزنتروبية لعملية الانضغاط

هـ) سعة التبريد لدورة تبريد بسيطة تعمل بهذا الضاغط

و) معامل أداء دورة التبريد .

الحل

أ) باستخدام معطيات المثال ، ومعادلة ٦.١١ تقدر إزاحة الكباس كما يلي

$$\overline{PD} = 0.6 \times \frac{\pi}{4} \times (0.15)^2 \times 0.12 \times \frac{3500}{60} = 0.0742 \quad m^3/s$$

ب) تقدرالكفاءة الحجمية من معادلة ٦.١٤ ، بإهمال التغير في الحجم النوعي لبخار المبرد قبل وبعد عملية السحب ، كما يلي

$$\eta_V = 1 + 0.01 - 0.01 (5) = 0.96$$

حيث استخدمت معادلة ٦.١٦ للتعويض عن نسبة الانضغاط r_p بدلالة نسبة الحجم ϕ.

جـ) من ملحق أ لمبرد ٢٢ نجد أن ضغط المبخر P_1 هو ١٦٣.٩ كيلوبسكال وضغط المكثف هو ١٩٤٣.٢ كيلوبسكال . وبأخذ قيمة n مساوية ١.٢ كما هو معطى بالمثال ، فإن قدرة التشغيل تعطى من معادلة ٦.٢. كما يلي

$$\dot{W} = \frac{1.20}{1.20 - 1} \times 163.9 \times 0.0742 \; (5^{0.2} - 1) +$$

$$163.9 \times 0.0742 \times 5^{0.2} \left(\frac{1943.2}{163.9 \times (5)^{1.2}} - 1 \right) = 39.76 \quad kW$$

د) بفرض دائرة تبريد بسيطة كالموضحة بشكل ٥.٩ ، ومن ملحق أ نجد أن الأنثالبي h_1 بخط السحب تساوي ٣٩٢.٥ كيلوجول/كجم وأنثالبي الخروج من الضاغط h_2 بخط الطرد تساوي ٤٥٥ كيلوجول/كجم ، وأنثالبي الخروج من المكثف h_3 تساوي ٢٦٣ كيلوجول/كجم وحجم البخار النوعي v_1 بخط سحب الضاغط يساوي ١٣٥.٠ متر³/كجم . عندئذ يحسب معدل الكتلة $\dot{m}$ التي يناولها الضاغط من معادلة ٦.١٥ كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{0.135} \times 0.0742 \times 0.96 = 0.528 \quad kg/s$$

وتكون قدرة التشغيل لعملية ايزنتروبية كما يلي

$$\dot{W}_{isen} = \dot{m}\ (h_2 - h_1) = 0.528\ (455 - 392.5) = 33\ \text{ kW}$$

وتحسب الكفاءة الحجمية الايزنتروبية من معادلة ٦.٢١ كما يلي

$$\eta_{isen} = \frac{33}{39.76} = 0.83$$

وهناك طريقة أخرى لحساب الكفاءة الأيزنتروبية . فبفرض أن بخار المبرد غاز مثالي، تحسب قدرة التشغيل عندئذ من معادلة ٦.١٧ بعد استخدام المؤشر الأيزنتروبي γ بدلاً من n واستخدام نسبة ضغط المكثف إلى ضغط المبخر بدلاً من نسبة الانضغاط r_p . من شكل ٥.٥ نجد أن قيم γ تساوي ١.١٣ . عندئذ تحسب قيمة قدرة التشغيل الأيزنتروبية كما يلي

$$\dot{W}_{isen} = \frac{1.13}{0.13} \times 163.9 \times 0.0742 \left[\left(\frac{1943.2}{163.9}\right)^{\frac{0.13}{1.13}} - 1 \right] = 34.8 \quad \text{kW}$$

بفرق أقل من ٦٪ من القيمة المحسوبة سابقاً . وتقدر قيمة الكفاءة الأيزنتروبية عندئذ كما يلي

$$\eta_{isen} = \frac{34.8}{39.76} = 0.87$$

هـ) تعطى سعة تبريد الدورة البسيطة كما يلي

$$\dot{Z} = \dot{m}\ (h_1 - h_3)$$
$$= 0.528\ (392.5 - 263) = 68.38 \quad \text{kW}$$

و) يقدر معامل أداء دورة التبريد البسيطة التي تعمل بالضاغط المعطى بهذا المثال كما يلي

$$COP = \frac{68.38}{39.76} = 1.72$$

مثال ٦.٤

في المثال السابق ادرس تغير الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط مع تغير درجة حرارة المكثف من ١٠ إلى ٥٠ °م .

الحل

يبين الجدول التالي ملخص الحسابات الناتجة عن تغير درجة حرارة المكثف باتباع نفس الخطوات الموضحة بالمثال السابق

درجة حرارة المكثف ، °م	١٠	٢٠	٣٠	٤٠	٥٠
ضغط المكثف ، كيلوبسكال	٦٨١	٩١٠	١١٩٢	١٥٣٤	١٩٤٣
نسبة ضغط المكثف إلى ضغط المبخر	٤.١٥	٥.٥٥	٧.٢٧	٩.٣٦	١١.٨٥
نسبة انضغاط الضاغط	٦.٩	٦.٩	٦.٩	٦.٩	٦.٩
المؤشر الأيزنتروبي	١.١٥٥	١.١٥	١.١٤٥	١.١٣٨	١.١٣٠
الكفاءة الأيزنتروبية	٠.٩٠٧	٠.٩٥٦	٠.٩٥٩	٠.٩٢٧	٠.٨٧٥

في الجدول السابق تم الحصول على ضغط المكثف بالسطر الثاني من ملحق.أ ، وبقسمة هذا الضغط على ضغط المبخر وقدره ١٦٣.٢ كيلوبسكال نحصل على النتيجة بالسطر الثالث. تحسب نسبة انضغاط الضاغط r_p في السطر الرابع بالجدول من معادلة ٦.١٦ وهي ثابتة كما هو موضح بالجدول نظراً لثبات نسبة الحجم ϕ بالضاغط . تم الحصول على المؤشر الأيزنتروبي γ بالسطر الخامس من شكل ٥.٥ ، وتم حساب الكفاءة الأيزنتروبية بالسطر الأخير بالجدول من المعادلة ٦.٢٢

٦.٩ تحسين أداء الضاغط اللولبي

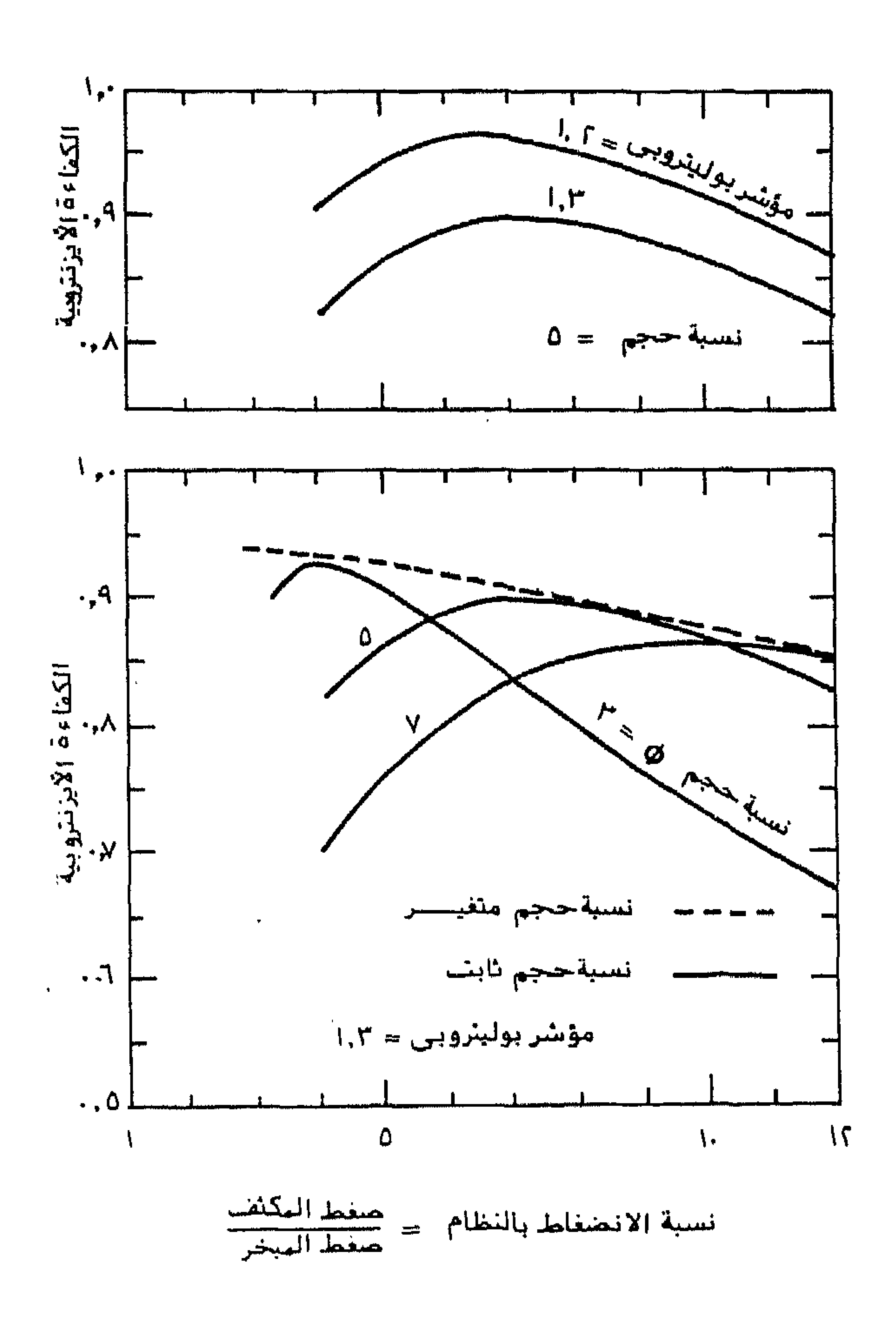
لاحظنا في المثال السابق تحسن قيمة الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط عندما يعمل الضاغط بين نسبة ضغط مكثف إلى ضغط مبخر مساوية لنسبة الانضغاط داخل الضاغط والتي تعتمد على نسبة الحجم ϕ للضاغط . لذا يلزم للمهندس المسئول عن توصيف الضاغط اللولبي تحديد ضغط المكثف وضغط المبخر بالنظام الذي سوف يستخدم الضاغط اللولبي ، عندئذ يختار ضاغطاً له نسبة حجم ϕ تعطي نسبةانضغاط r_p مساوية لنسبة انضغاط النظام أو أعلى منه قليلاً . ويقوم مصنعو الضواغط اللولبية بتصنيعها بثلاث أو أربع فتحات طرد ، بنسبة حجم محدودة لكل فتحة طرد ، حتى يمكن عمل الضاغط بأعلى كفاءة أيزنتروبية ممكنة تبعاً لنسبة انضغاط النظام الذي سيعمل معه الضاغط . أيضاً ، أمكن حديثاً تصنيع ضواغط لولبية تعمل بنسبة حجم ϕ متغيرة حيث تتغير قيمة نسبة الحجم بالضاغط مع تغير نسبة انضغاط النظام (أي نسبة ضغط المكثف إلى ضغط المبخر).

ويوضح شكل ٦.١٢ تغير الكفاءة الأيزنتروبية مع نسبة انضغاط النظام ، لضاغط لولبي له نفس المواصفات المعطاه بمثال ٦.٣ . ويوضح الشكل تأثير كل من المؤشر البوليتروبي n ونسبة الحجم ϕ للضاغط على هذا التغير . ويمكن استنتاج الآتي من الشكل :

أ) تحسن أداء الضاغط بانخفاض قيمة n حيث تقترب قيمة n من قيمة المعامل الأيزنتروبيγ .

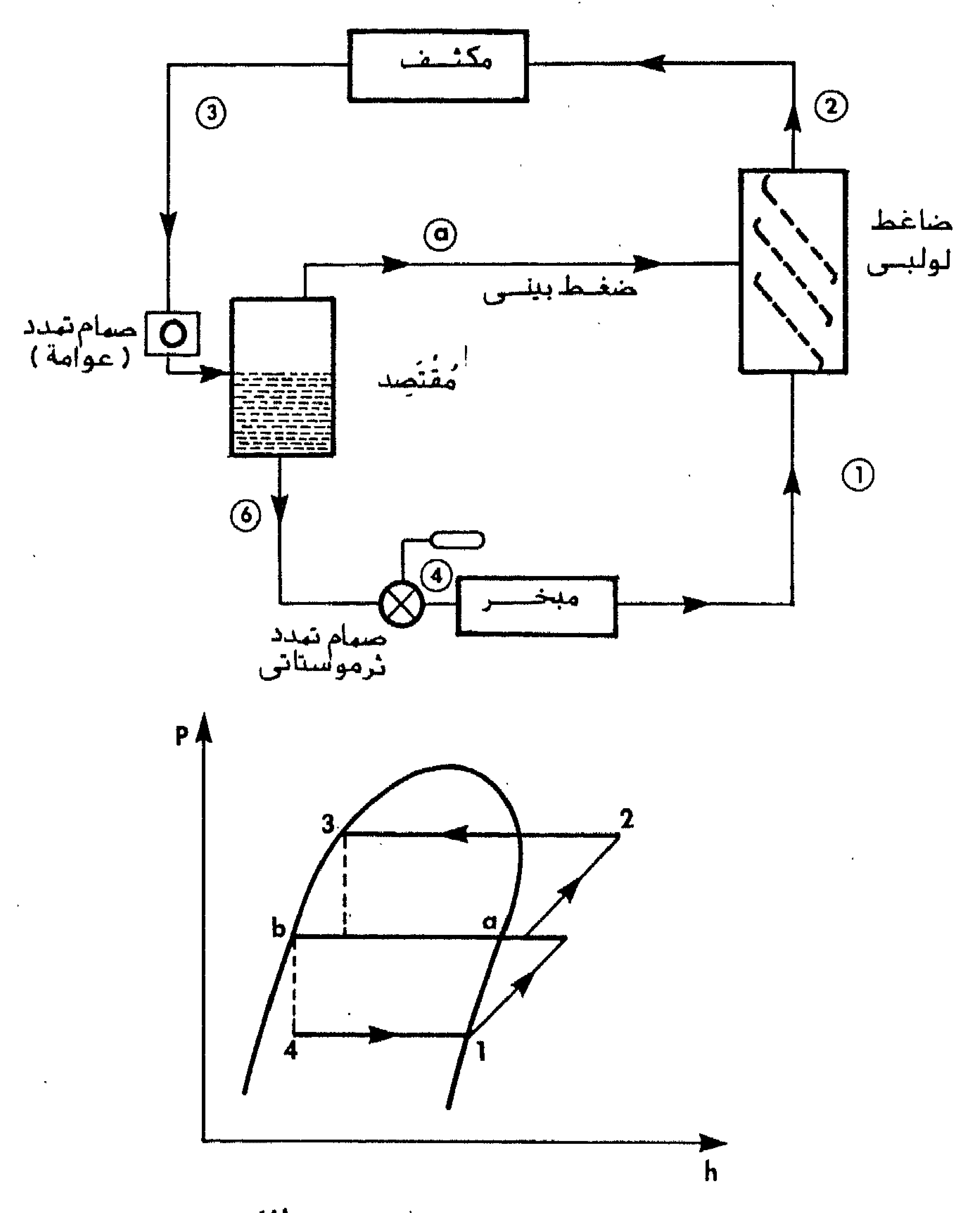
ب) يمر المنحنى الذي يمثل الكفاءة الأيزنتروبية لضاغط متغير نسبة الحجم بنقاط أعلى كفاءة لمنحنيات الكفاءة الأيزنتروبية للضواغط ذوات نسبة حجم ثابتة .

أيضاً لتحسين أداء الضواغط اللولبية يستخدم في بعض النظم مُقْتَصِد ، وهو



شكل ٦.١٢ تاثير قيمة المؤشر البوليتروبي ونسبة الحجم لضاغط لولبي على تغير الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط مع نسبة انضغاط نظام التبريد . بيانات الضاغط ونظام التبريد كما هو معطى بالمثال ٣ ٦ .

عبارة عن خزان بخر فجائي يوضع عند ضغط بيني ، أي بين ضغطي المكثف والمبخر ، وينتج عن تمدد سائل المبرد إلى هذا الضغط البيني تبخر جزء من السائل إلى الحالة "a" بشكل ٦.١٣ بينما يبرد السائل الباقي إلى الحالة "b" مما يعني زيادة التاثير التبريدي للمبرد . ويُسْحَب البخار المشبع عند الحالة a بالضاغط باستخدام وصلة سحب ثانوية عند نقطة داخل عملية الانضغاط لها ضغط بخار أقل قليلاً من الضغط البيني للبخار المسحوب.



شكل ٦.١٣ نظام تبريد يستخدم ضاغط لولبي ومُقْتَصِد

ويعمل الضاغط على انضغاط هذا البخار المسحوب ، بالإضافة إلى البخار الأساسي بالضاغط ، إلى ضغط الطرد . ويساعد وجود المُقْتَصِد على زيادة سعة تبريد الضاغط بحوالي من ١٠ إلى ٤٠٪ من سعة التبريد الأصلية ، وتكون الزيادة في قدرة التشغيل أقل من التحسين في سعة ، التبريد مما يعني تحسن معامل أداء نظام التبريد عند استخدام

المُقتصِد.

مثال ٦.٥

في مثال ٦.٣ إذا كان المعامل البوليتروبي لعملية الانضغاط هو ١.٣ ، وكان الضاغط يعمل بنسبة انضغاط متغيرة ، احسب هذه النسبة لظروف تشغيل نظام التبريد المعطى بالمثال ، واحسب الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط.

الحل

من شكل ٥.٥ نجد قيمة γ تساوي ١.١٣ . من مثال ٦.٣ تحسب نسبة انضغاط النظام كما يلي

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1943.2}{163.9} = 11.85$$

أي أن نسبة الضغوط الداخلية للضاغط يجب أن تساوي ١١.٨٥ . من معادلة ٦.١٦ تحسب نسبة حجم الضاغط كما يلي

$$\phi = (11.85)^{1/1.3} = 6.7$$

نحسب الكفاءة الأيزنتروبية عند هذه الظروف من معادلة ٦.٢٢ التي تبسط عند هذه الظروف إلى الصورة التالية

$$\eta_{isen} = \frac{\gamma/(\gamma-1)}{n/(n-1)} \cdot \frac{\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]}{\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]}$$

$$= \frac{1.13 \;/\; 0.13}{1.3 \;/\; 0.3} \cdot \frac{(11.85^{0.13/1.13} - 1)}{(11.85^{0.3/1.3} - 1)} = 0.858$$

وهي نفس القيمة المعطاه من شكل ٦.١٢ .

٦.١٠ تزييت الضواغط اللولبية

يتم تزييت الضواغط اللولبية في أغلب الأحيان بطريقة الغمر حيث تستخدم مضخة لحقن زيت التزييت إلى الحامل وفتحات التزييت في جسم الأسطوانة الخارجية وتصل هذه الفتحات إلى الفراغات بين النتوءات بالدوار الذكر والتجاويف بالدوار الأنثى أثناء عملية الانضغاط . ويخدم زيت التزييت ثلاثة أغراض أساسية :

أ) تزييت الحامل للدوارين وكذلك تزييت نقطة التلامس بين الدوارين .

ب) منع تسرب بخار المبرد عندما يتم تعشيق النتوءات والتجاويف بالدوارين وذلك بأن يكّوِن الزيت طبقة لزجة تملأ أى فراغات بين سطحي الدوارين . وكذلك يمنع الزيت ، بنفس الطريقة ، تسرب البخار المضغوط خلال نقط تماس الدوارين مع السطح الداخلي للأسطوانه الحاوية .

جـ) تبريد بخار المبرد أثناء عملية الانضغاط مما يضمن عدم ارتفاع درجة حرارة الطرد عن حد معين (لا يزيد عادة عن ٩٠ ° م) مهما كان الارتفاع في نسبة الانضغاط المتاحة بالضاغط . ويساعد هذا على حماية المبرد والزيت من التحلل عند درجات الحرارة المرتفعة.

ويلزم عند استخدام مضخة لإمداد زيت التزييت مراعاة أن يكون معدل ضخ الزيت حوالي ٠.٥ ٪ من قيمة إزاحة الكباس للضاغط (انظر معادلة ٦.١١) ، كما يجب مراعاة أن يزيد ضغط الزيت عند فتحات الحقن ، الموجودة خلال عملية الانضغاط ، بحوالي من ٠.٢ إلى ٠.٣ ميجابسكال عن ضغط الطرد للضاغط . ويمكن في بعض أنواع الضواغط الاستغناء عن مضخة الزيت حيث يحفظ خزان الزيت في خط الطرد من الضاغط مما يحافظ على

ضغط الزيت عند ضغط الطرد ، ويساعد هذا الضغط المرتفع على حقن الزيت خلال الفتحات المختلفة بجسم الضاغط حيث يكون ضغط البخار عند نقطة الحقن أقل من ضغط الزيت . ويجب عند استخدام الضواغط اللولبية ، التي تزيت بالطريقة السابقة ، وجود فاصل زيت بخط الطرد للضاغط ، لفصل زيت التزييت عن الغاز الساخن ، ومن ثم إعادة هذا الزيت لتزييت الضاغط مرة أخرى .

وكما بينا ، يستخدم الزيت لتبريد بخار المبرد أثناء عملية الانضغاط ، لذا يلزم أن توجد طريقة ما لتبريد الزيت مرة أخرى . وهناك عدة طرق لتبريد الزيت أهمها الطرق الآتية :

أ) حقن سائل مبرد من مستقبل المبرد إلى عدة نقاط خلال عملية الانضغاط . ويقدر معدل سريان هذا السائل بحوالي ٢٠ . .٪ من إزاحة الكباس بالضاغط ، ويتم عادة التحكم في هذا المعدل بحاس لدرجة حرارة الطرد من الضاغط والعمل على تثبيت هذه الدرجة . ومن أهم عيوب هذه الطريقة احتمال تسرب جزء من هذا السائل إلى مناطق الضغط المنخفض بالضاغط ، مما يؤدي إلى ارتفاع الضغط بهذه المناطق وخفض معدل البخار المسحوب بالضاغط (أي انخفاض الكفاءة الحجمية للضاغط) . أيضاً ، بتبخير جزء من هذا السائل أو كله ، يلزم للضاغط بذل قدرة انضغاط إضافية لهذا البخار الناتج ، بالإضافة إلى انخفاض سعة تبريد الضاغط نتيجة انخفاض كفاءته الحجمية (بسبب انخفاض معدل البخار الذي يستطيع الضاغط سحبه) . ولتقليل هذه العيوب ينصح عادة بحقن سائل المبرد عند نقاط أقرب ما تكون إلى فتحة الطرد . وتقدر عادة الزيادة في القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط بحوالي من ١٪ إلى ١٠٪ من القدرة الأساسية للانضغاط ، وذلك تبعاً لنسبة الانضغاط . ولا يحتاج حقن سائل المبرد بهذه الطريقة أي مضخة نظراً لوجود سائل المبرد عند ضغط المكثف الذي هو أعلى من الضغط عند أي نقطة من النقاط خلال عملية الانضغاط .

ب) استخدام مضخة لحقن سائل المبرد من المستقبل إلى خط طرد الغاز الساخن من

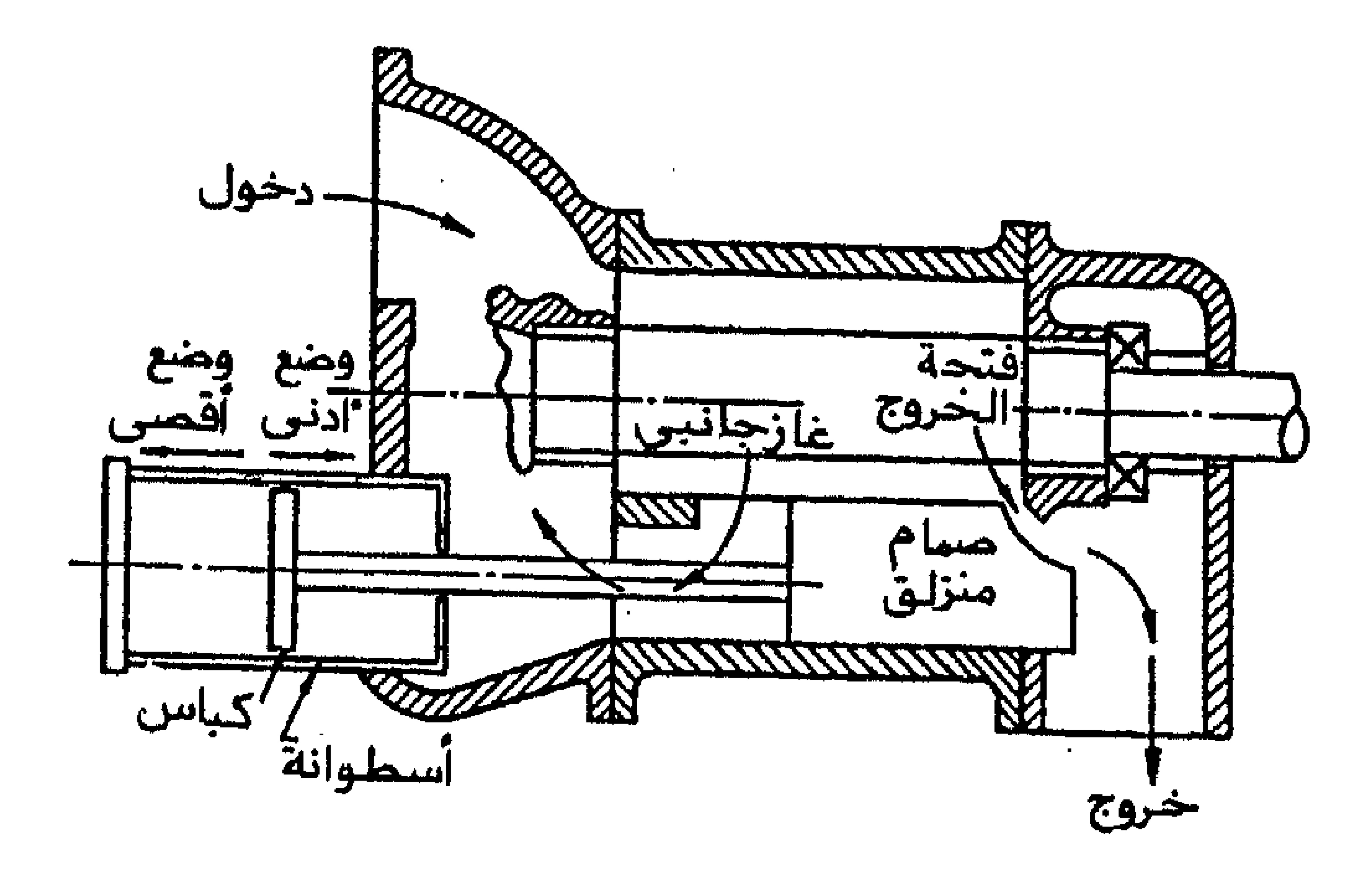
الضاغط وتستهلك هذه المضخة عادة قدرة تعادل حوالي ١٠٠٪ من القدرة المستهلكة بالضاغط .

جـ) يبرد زيت التزييت ، خارج الضاغط بعد فصله عن الغاز الساخن ، باستخدام مبادل حراري . ويمكن في هذا المبادل الحراري استخدام الماء سواء من مصدرمنفصل أو استخدام نفس الماء المستعمل لتبريد المكثف ، أو استخدام ماء تم تبريده بالمبخر لهذا الغرض ، أو استخدام هواء بسريان قسري بمروحة ، أو استخدام سائل المبرد القادم من المستقبل . ويُفاضل بين هذه الطرق المختلفة تبعاً للنظام المستخدم في التبريد وموقع الضاغط بالنسبة للمكونات الأخرى لنظام التبريد .

٦.١١ التحكم في سعة تبريد الضواغط اللولبية

عرضنا في الفصل الخامس طرق التحكم في سعة تبريد الضواغط الترددية . ويمكن عند الحاجة للتحكم في سعة تبريد الضواغط اللولبية استخدام نفس هذه الطرق ماعدا طريقة تحميل أو تفريغ أسطوانة أو أكثر من أسطوانات الضاغط . وتعتبر طريقة تغير سرعة دوران الضاغط هي أنسب هذه الطرق لتغير سعة التبريد ، إلا أن الضواغط اللولبية تستخدم أيضاً طريقة أخرى لهذا الغرض وهي الطريقة المعروفة بالتحكم في إزاحة الكباس . وتستخدم هذه الطريقة أيضاً لتفريغ الضاغط جزئياً عند بداية التشغيل ، لخفض عزم البداية . وهناك نوعين من الصمامات لهذا الغرض الأول يعرف بصمام السعة المنزلق والآخر بصمام السعة الرافع .

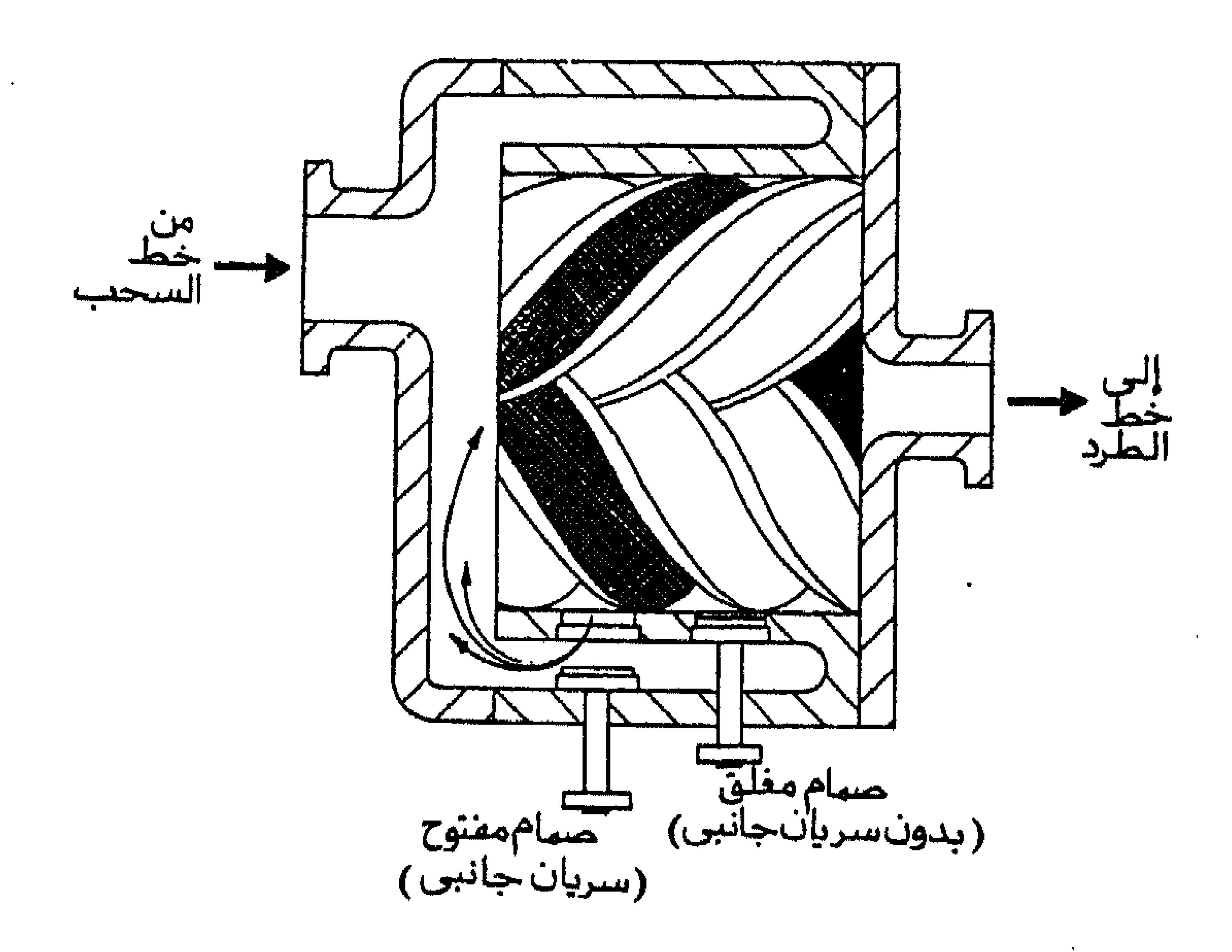
يتكون صمام السعة المنزلق ، كما هو مبين بشكل ٦.١٤ من كباس منزلق يتحكم في فتحة طرد الغاز الساخن من الضاغط وفتحة تجنيب البخار المسحوب بالضاغط . ويعمل هذا الكباس المنزلق بتأثير ثرموستات متصل مباشرة بالحمل الحراري . فبزيادة



شكل ٦.١٤ رسم تخطيطي لصمام السعة المنزلق لضاغط لولبي [الأشراي ، ١٩٨٨] .

الحمل الحراري ، ترتفع درجة حرارته ، فيعمل الثرموستات على انزلاق الكباس إلى الجهة اليسرى ، مما يساعد على كبر فتحة الطرد وتصغير فتحة تجنيب البخار المسحوب ، والعكس صحيح فبنقصان الحمل الحراري تنخفض درجة الحرارة ، ويعمل الثرموستات على انزلاق الكباس إلى الجهة اليمنى فتضيق فتحة الطرد وتتسع فتحة تجنيب البخار المسحوب . وبهذه الطريقة للتحكم في سعة التبريد يقل معدل البخار الذي يناوله الضاغط خطياً مع الحمل الحراري ، وبالتالي تقل قدرة التشغيل خطياً أيضاً مع الحمل الحراري .

باستخدام صمام السعة المنزلق يتم التحكم في السعة تدريجياً بطريقة خطية بين ١٠٠٪ إلى ١٠٪ من سعة التبريد الأسمية . أما باستخدام صمام السعة الرافع ، والمبين بشكل ٦.١٥ فإن التحكم بالسعة يتم على عدد محدود من الخطوات . يضم هذا الصمام عدداً معيناً من السدادات التي تعمل على فتح أو غلق فتحات بجسم الأسطوانة الحاوية للدوارين . فبانخفاض حمل التبريد تفتح أقرب هذه السدادات إلى خط السحب مما يؤخر عملية الانضغاط لتبدأ من هذه الفتحة نتيجة تجنيب البخار المسحوب . فإذا انخفض حمل التبريد مرة أخرى رفعت السدادة التالية إلى اليمين ، وهكذا . وبالرغم من سهولة أداء صمام السعة الرافع إلا أنه لا يعطي انخفاضاً خطياً في قدرة التشغيل مع سعة التبريد ، لذا



شكل ٦.١٥ رسم تخطيطي لصمام السعة الرافع لضاغط لولبي [الأشراي ، ١٩٨٨] .

لا يستخدم هذا الصمام إلا في الحالات التي يكون من طبيعة حمل التبريد بها التغير على عدة خطوات ، وخلافاً لذلك يفضل عادة استخدام صمام السعة المنزلق .

٧

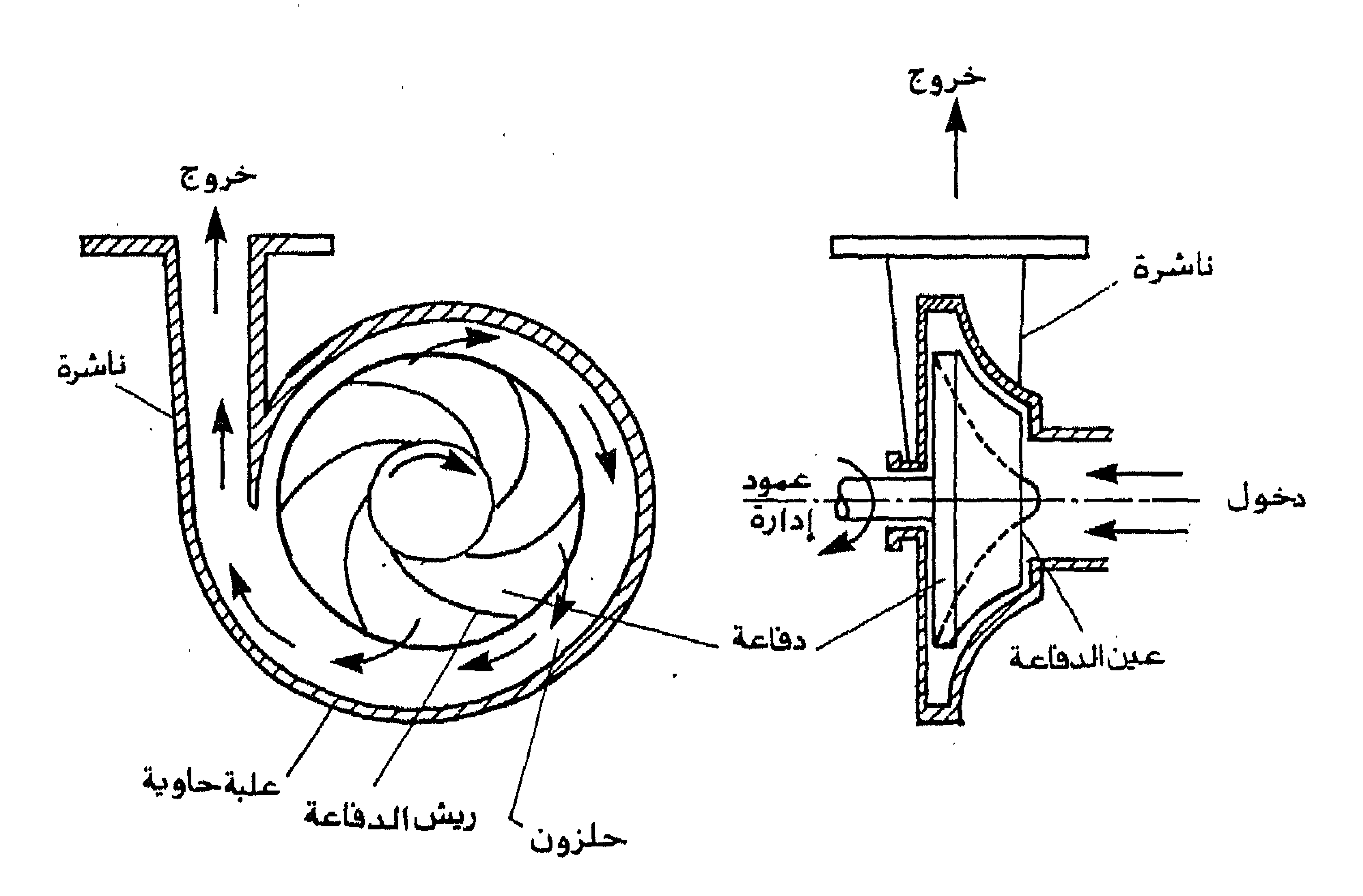
ضواغط الطرد المركزي

٧.١ مقدمة

ضواغط الطرد المركزي هي ضواغط ديناميكية تعمل بتحويل طاقة الحركة إلى ضغط. وتستخدم هذه الضواغط قوة الطرد المركزي لرفع طاقة حركة الغاز . كما تمتاز هذه الضواغط عامة بسهولة أدائها وقوة تحملها وقلة عدد الأجزاء المتحركة بها بالمقارنة بالضواغط الترددية ، مما يؤدي إلى عمل هذه الضواغط بكفاءة مرتفعة تتراوح بين ٧٠ إلى ٨٠٪ عادة عند ظروف تشغيل مختلفة . وتُستَخْدَم هذه الضواغط في النظم ذات سعة التبريد الكبيرة ، ولا يمكن استخدامها في التطبيقات التي تحتاج إلى سعة تبريد أقل من ١٠٠ طن تبريد (٣٥٠ كيلووات) . وتستخدم ضواغط الطرد المركزي أيضاً بنجاح في نظم درجات الحرارة المنخفضة متعددة المراحل حتى – ١٠٠° م .

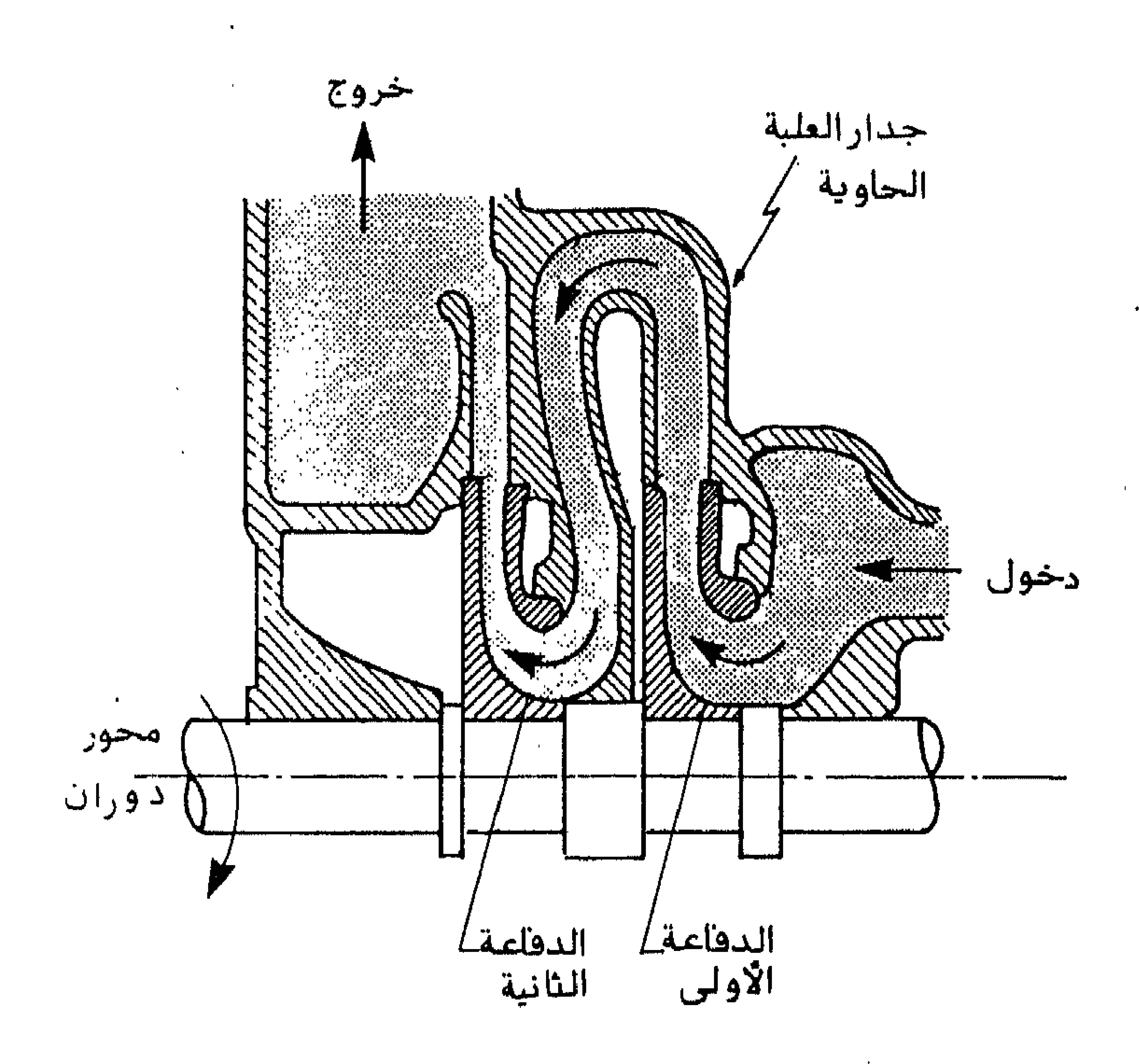
٧.٣ فكرة التشغيل

يتكون ضاغط الطرد المركزي من المكونات الأساسية الآتية : دفاعة مروحية ، وعمود إدارة ، وعلبة حاوية ، كما هو مبين بشكل ٧.١ . وبدوران عمود الإدارة تدور الدفاعة فتسحب الغاز أو البخار المراد ضغطه من عين الدفاعة ثم تدفعه في اتجاه إشعاعي من المحور إلى الخارج بقوة الطرد المركزية التي تعمل على رفع سرعة وضغط ودرجة حرارة الغاز أثناء هذه العملية . عند الخروج من الدفاعة يسري الغاز في اتجاه حلقي في حلزون حيث تكبر مساحة مقطع الحلزون في اتجاه السريان مما يعمل على استرجاع جزء من طاقة الحركة بالغاز إلى ضغط ، ويخرج السريان من الضاغط خلال ناشرة في نهاية الحلزون حيث يحول جزء آخر من طاقة حركة الغاز إلى ضغط .



شكل ٧.١ رسم تخطيطي لضاغط طرد مركزي أحادي الدفاعة .

مما سبق يتضح أن عملية الانضغاط تنتج أساساً عن قوة الطرد المركزية التي تزيد طاقة حركة الغاز ، ثم يُحَوّل جزء كبير من هذه الطاقة إلى ضغط . ويعتمد تصميم الحلزون والناشرة وكذا أبعاد الدفاعة المروحية إلى حد كبير على المقدار المطلوب لرفع الضغط ، حيث تكبر أبعاد الضاغط وسرعة دوران الدفاعة كلما احتاج المصمم إلى رفع ضغط الطرد من الضاغط . وهناك بالطبع حدود هندسية لقطر الدفاعة ، وسرعة الدوران التي لا يفضل تجاوزها ، مما يعني عدم إمكانية زيادة ضغط الطرد عن حد معين تحت هذه الظروف . وللتغلب على هذه المشكلة يستخدم ضاغط متعدد المراحل حيث يدخل الغاز الخارج من الدفاعة الأولى إلى عين الدفاعة الثانية لضغطه مرة أخرى مما يساعد على رفع ضغط الطرد، وهكذا . ولقد أمكن عملياً تصميم ضواغط متعددة المراحل بحد أقصى قدره ١٢ مرحلة . ويبين شكل ٧.٢ رسماً تخطيطياً لضاغط طرد مركزي ثنائي المرحلة (أي ثنائي الدفاعة) .

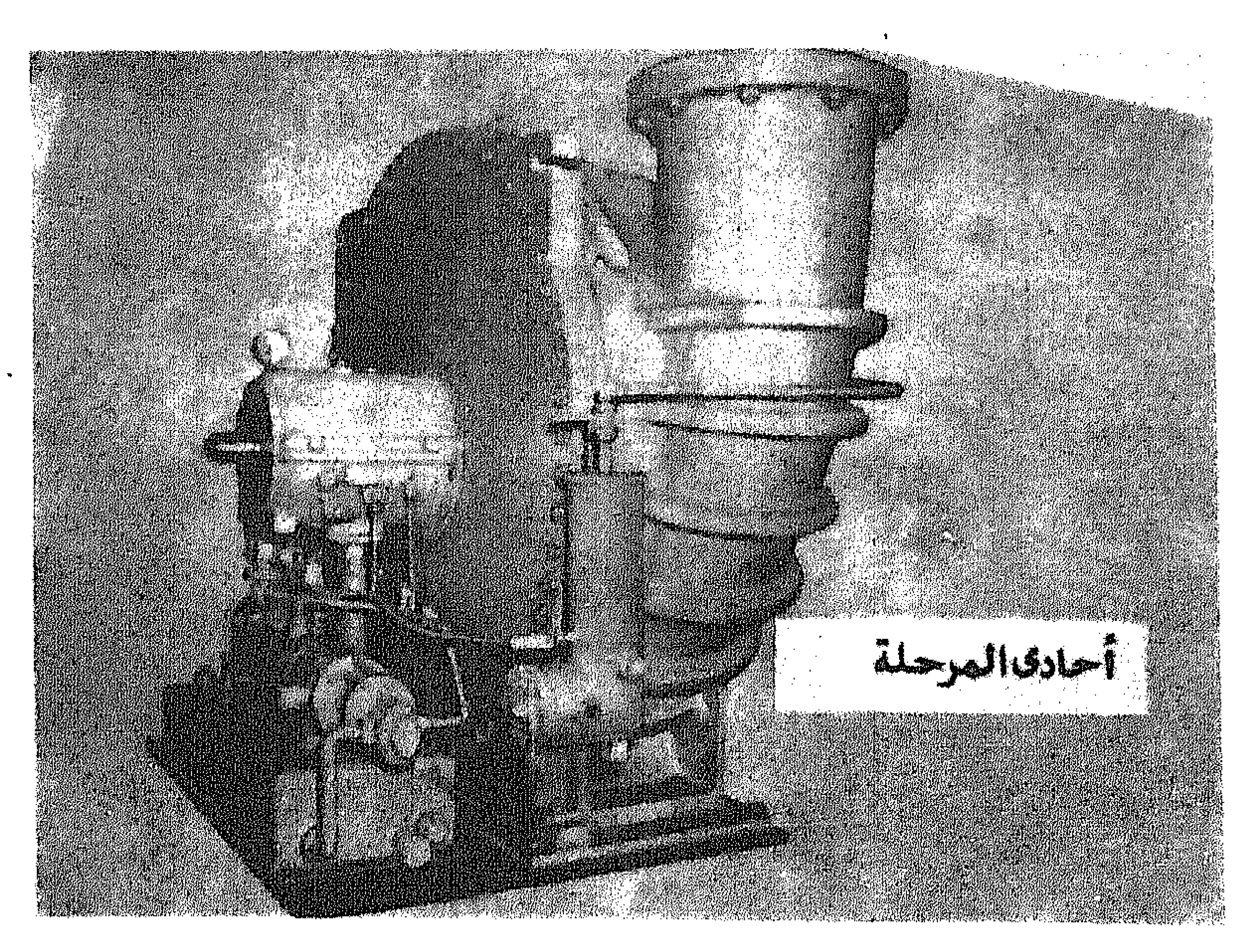


شكل ٧.٢ رسم تخطيطي يوضح سريان الغاز بضاغط طرد مركزي ثنائي المرحلة .

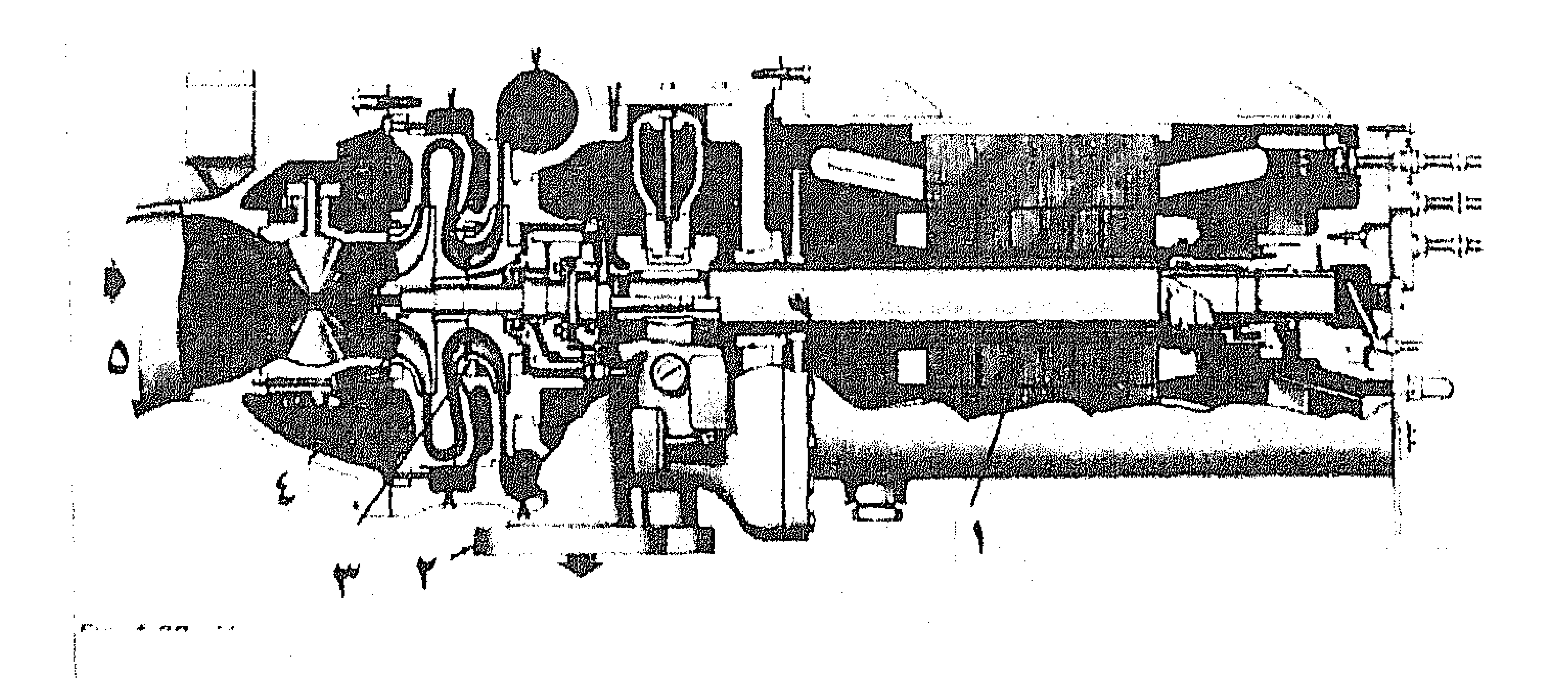
وكما هو الحال في الأنواع الأخرى من الضواغط ، تقسم ضواغط الطرد المركزي إلى ضواغط مفتوحة وضواغط محكمة الفلق وضواغط نصف مغلقة . وتُصْنَع الضواغط المحكمة الفلق بسعات تتراوح بين ٧٥ إلى ٢٠٠٠ طن تبريد ، أما الضواغط المفتوحة فتتوفر ابتدء من ١٠٠٠ حتي ١٠٠٠٠ طن تبريد ولا تصنع عادة ضواغط الطرد المركزي بسعات تبريد أقل من ٧٥ طن تبريد حيث تصغر أبعاد الدفاعة المروحية إلى الحد الذي يجعل الفقد في القدرة الناتج عن احتكاك السريان داخل الضاغط ، يمثل جزء محسوساً من القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط ، مما يقلل من كفاءة الضاغط إلى قيم غير مقبولة عملياً . ويوضح شكلي ٧.٣ و ٧.٤ صورتين فوتوغرافيتين لضاغط مفتوح وآخر نصف محكم الفلق .

٧.٣ تركيب الضاغط

كما بينا في الجزء السابق يتكون الضاغط أساساً من دفاعة مروحية ومحور دوران



شكل ٧.٣ ضاغط طرد مركزي أحادي المرحلة من النوع المفتوح [شركة كارير ١٩٧٧، كتالوج رقم ٧١٤-٥٢١] .



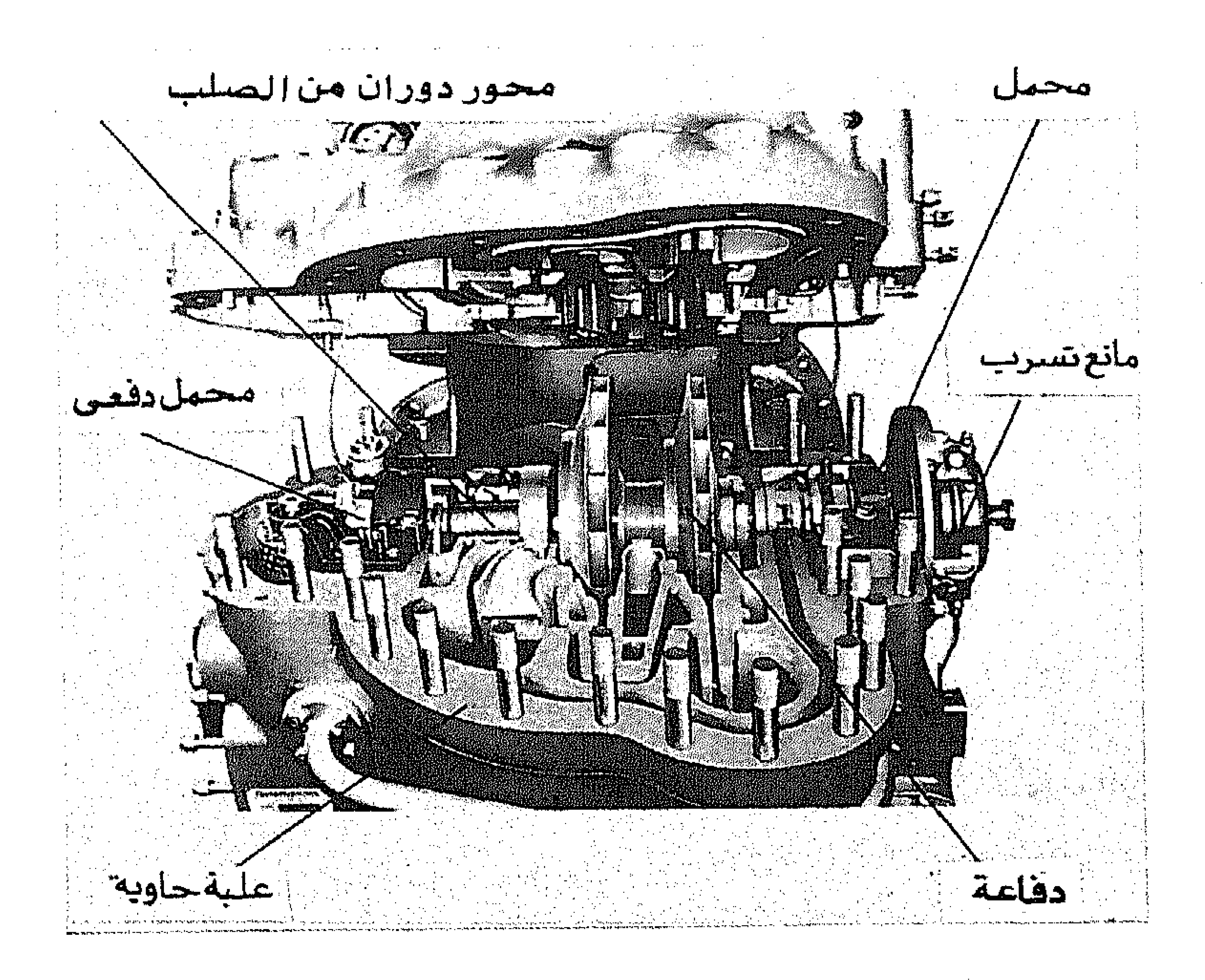
١ موتور محكم الغلق ٢ خروج الغاز المضغوط ٣ دفاعة المرحلة الثانية

٤ دفاعة المرحلة الأولى ٥ دخول الغاز

شكل ٧,٤ ضاغط طرد مركزي من النوع نصف المغلق .

وعلبة حاوية حلزونية الشكل متصلة بناشرة عند خروج الغاز من الضاغط بالإضافة إلى أجزاء أخرى .

تصنع الدفاعات المروحية عادة من الألومنيوم أو الصلب تبعاً للتطبيق المستخدم للضاغط . ويفضل الألومنيوم عن الصلب في التطبيقات التي تعمل عند درجات حرارة أقل من ١٥٠° م حيث يكون للألومنيوم نسبة قوة إلى وزن أفضل من الصلب ، أما إذا زادت درجة الحرارة عن ١٥٠ ° م فإن الصلب يصبح أفضل من الألومنيوم نظر لتمدد الألومنيوم بدرجة كبيرة عند ارتفاع درجة الحرارة . وتثبت الدفاعات إلى محور الدوران بطريقة الشحط ومسامير لمنع تحرك هذه الدفاعات على المحور نتيجة التمدد الحراري أو قوة الطرد المركزي . وتحوي الدفاعات أرياشاً خلفية الانحناء أو إشعاعية ، ولا تستخدم الأرياش أمامية الانحناء في ضواغط الطرد المركزي .



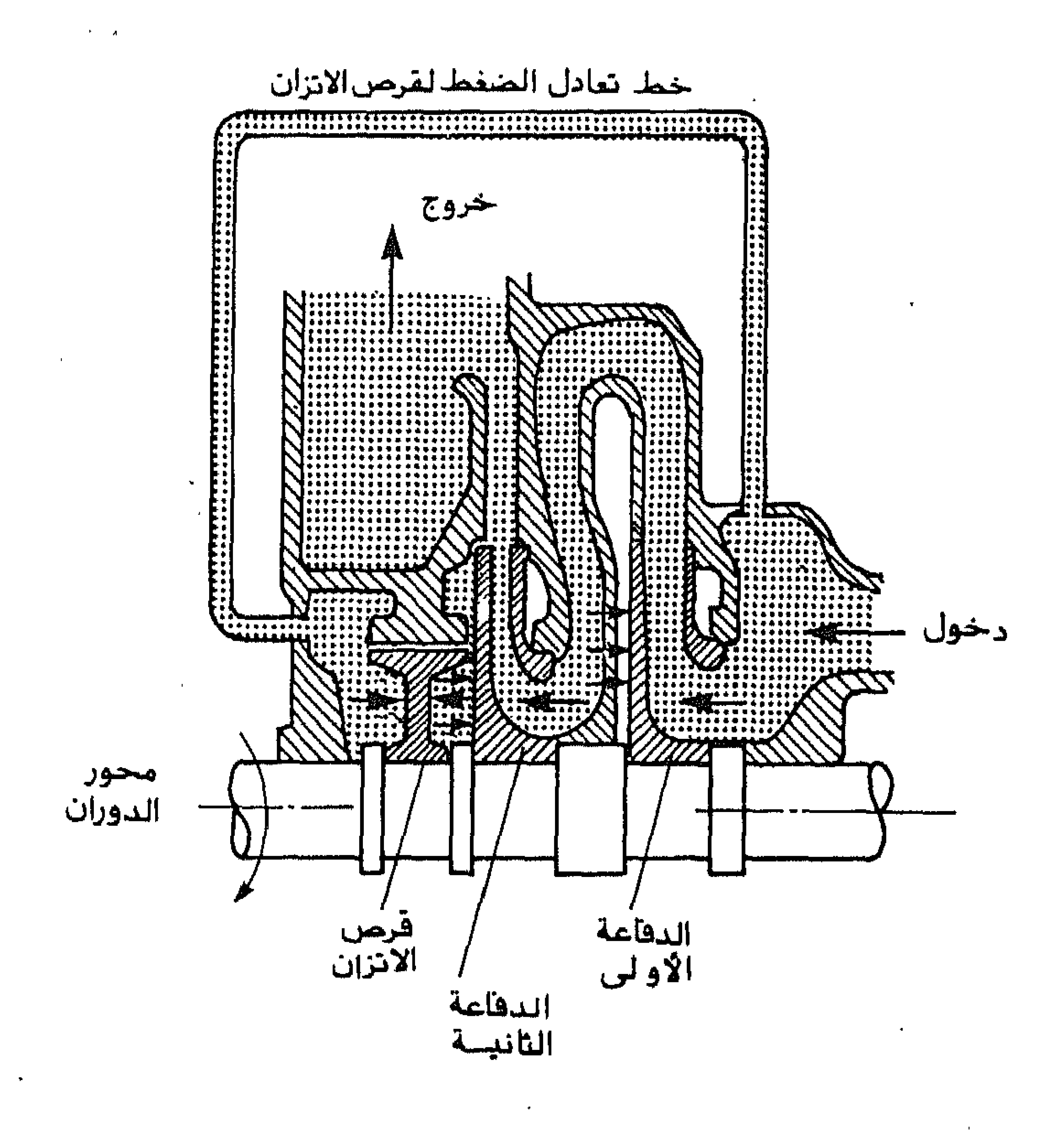
شكل ٧.٥ صورة فوتوغرافية توضيحية لضاغط طرد مركزي ثنائي الدفاعة [شركة كارير ١٩٧٧ ، كتالوج ٧١٤-٥٢١].

يصنع محور الدوران بالضاغط عادة من الصلب . ويدار المحور بموتور كهربائي خاص أو بتوربين ، مباشرة أو عن طريق تروس سرعات . فإذا كان الدوران بموتور كهربائي ثنائي القطب فإن سرعة الدوران القصوى تكون عادة حوالي ٢٩٠٠ لفة/دقيقة لتيار تردده ٥٠ هرتز أو ٣٥٠٠ لفة/دقيقة لتيار بتردد ٦٠ هرتز. فإذا تطلب الضاغط سرعة دوران أكبر من سرعة الدوران القصوى للموتور لزم استخدام تروس سرعات ، أو توربينة ، أو توليد تيار كهربائي بالتردد اللازم لتوليد سرعة الدوران المطلوبة .

تضم العلبة الحاوية مكونات الضاغط ، وتصنع هذه العلبة عادة من الحديد الزهر ويكّوِن سطح الجدار الداخلي للعلبة مع محيط الدفاعة شكلاً حلزونياً لسريان الغاز

المضغوط إلى الخارج . ويتصل الحلزون عند مخرجه بناشرة تحوي في بعض الأحيان أرياش توجيه . وفي الضواغط المفتوحة متعددة المراحل تُقْسَم العلبة الحاوية أفقياً من منتصفها إلى نصفين يسهل فصلهما لصيانة الضاغط . ويركب عند طرفي العلبة الحامل اللازمة لحمل محور الدوران والأجزاء المركبة عليه . وتصنع هذه الحامل عادة من الألومنيوم والبرونز والبابت . ويوضح شكل ٧.٥ مقطعاً في ضاغط مفتوح ثنائي المرحلة .

ينشأ عن فرق الضغط على الأسطح الأمامية والخلفية للدفاعات قوة دفع محورية في اتجاه معاكس لاتجاه سريان الغاز عبر الضاغط . لذا يلزم تركيب محمل دفعي عند أحد طرفي محور الدوران للتغلب على هذه القوة . كما يمكن أيضاً تقليل هذه القوة أو التخلص منها تماماً بعدة طرق تصميم منها على سبيل المثال الآتي :



شكل ٧.٦ قرص الإتزان لمعادلة قوى الدفع المحوري للدفاعات .

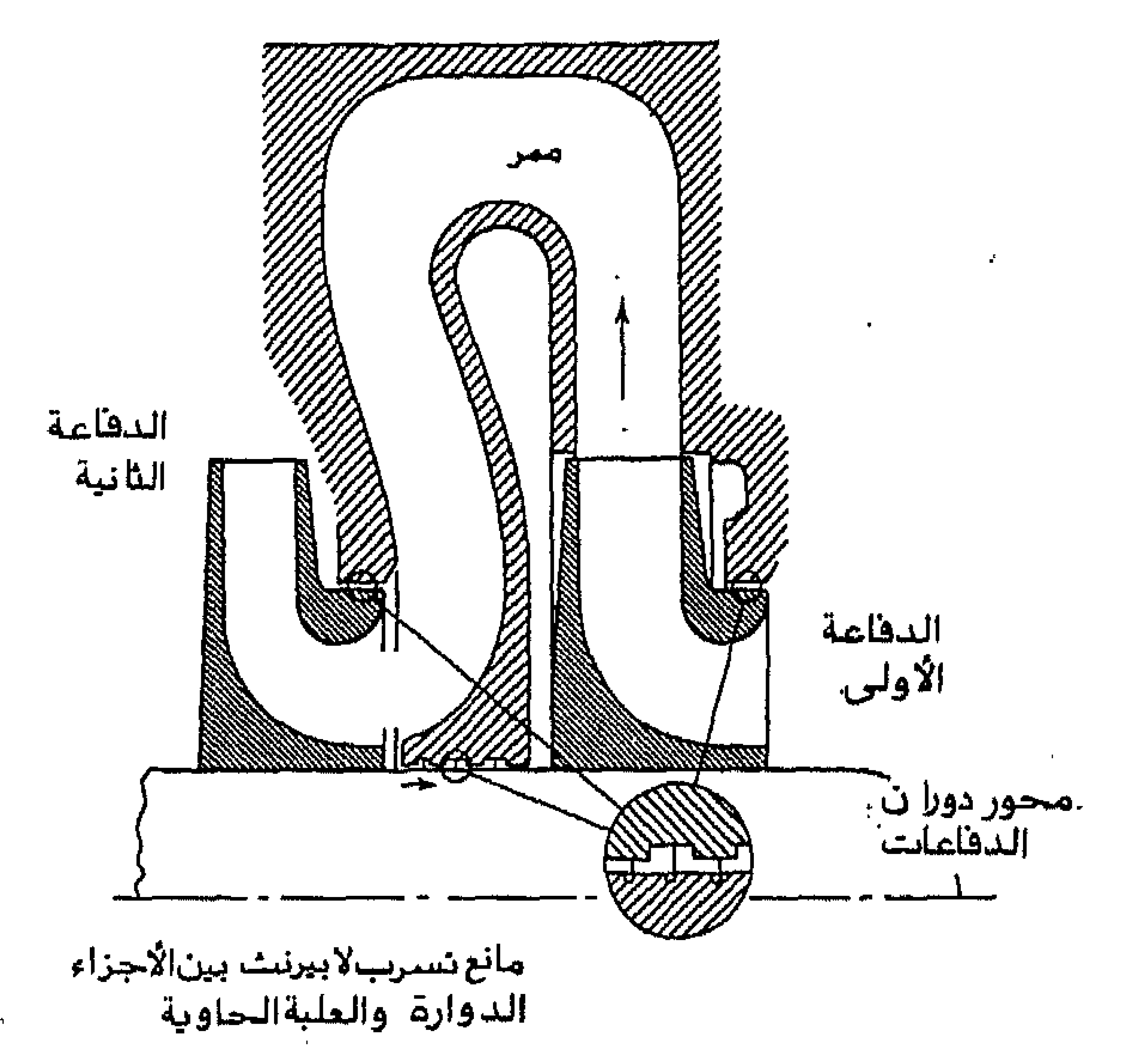
أ) تركيب الدفاعات ظهراً إلى ظهر حيث تلغي مكونات القوة الناشئة من فرق الضغط بعضها بعضاً ، وتقل قوة الدفع الإجمالية بمقدار ملحوظ .

ب) تركيب قرص اتزان أو كباس اتزان بعد الدفاعة الأخيرة حيث يكون الضغط على وجه القرص الأمامي مساوياً للضغط على السطح الخلفي للدفاعة الأخيرة ، ويلزم عندئذ توصيل السطح الخلفي للقرص بخط تعادل خارجي إلى مدخل الضاغط ، كما هومبين بشكل ٧.٦ .

يحتاج الضاغط إلى مانع تسرب عند دخول محور الدوران إلى الضاغط في حالة الضاغط من النوع المفتوح (أنظر شكل ٧.٥) . أما الضواغط من النوع المغلق فلا تحتاج إلى مانع تسرب .كما يستعمل أيضاً مانع تسرب من نوع لابيرنث بين الدفاعات بالمراحل المتتالية بالضاغط . ويتكون مانع تسرب لابيرنث من عدة شرائح من الصلب مثبتة على المحيط الخارجي لعين الدفاعة حيث تغطي هذه الشرائح تجاويف مناظرة لها موجودة على السطح الثابت لجسم العلبة الحاوية . ويوضع أيضاً مانع تسرب لابيرنث بين محور الدوران وممر دخول الدفاعات التالية للدفاعة الأولى كما هو مبين بشكل ٧.٧ . ويعتبر هذا النوع من موانع التسرب مؤثراً جداً في تقليل تسرب الغاز إلى خارج الضاغط وبين المراحل المختلفة بالضاغط .

٧.٤ التزييت

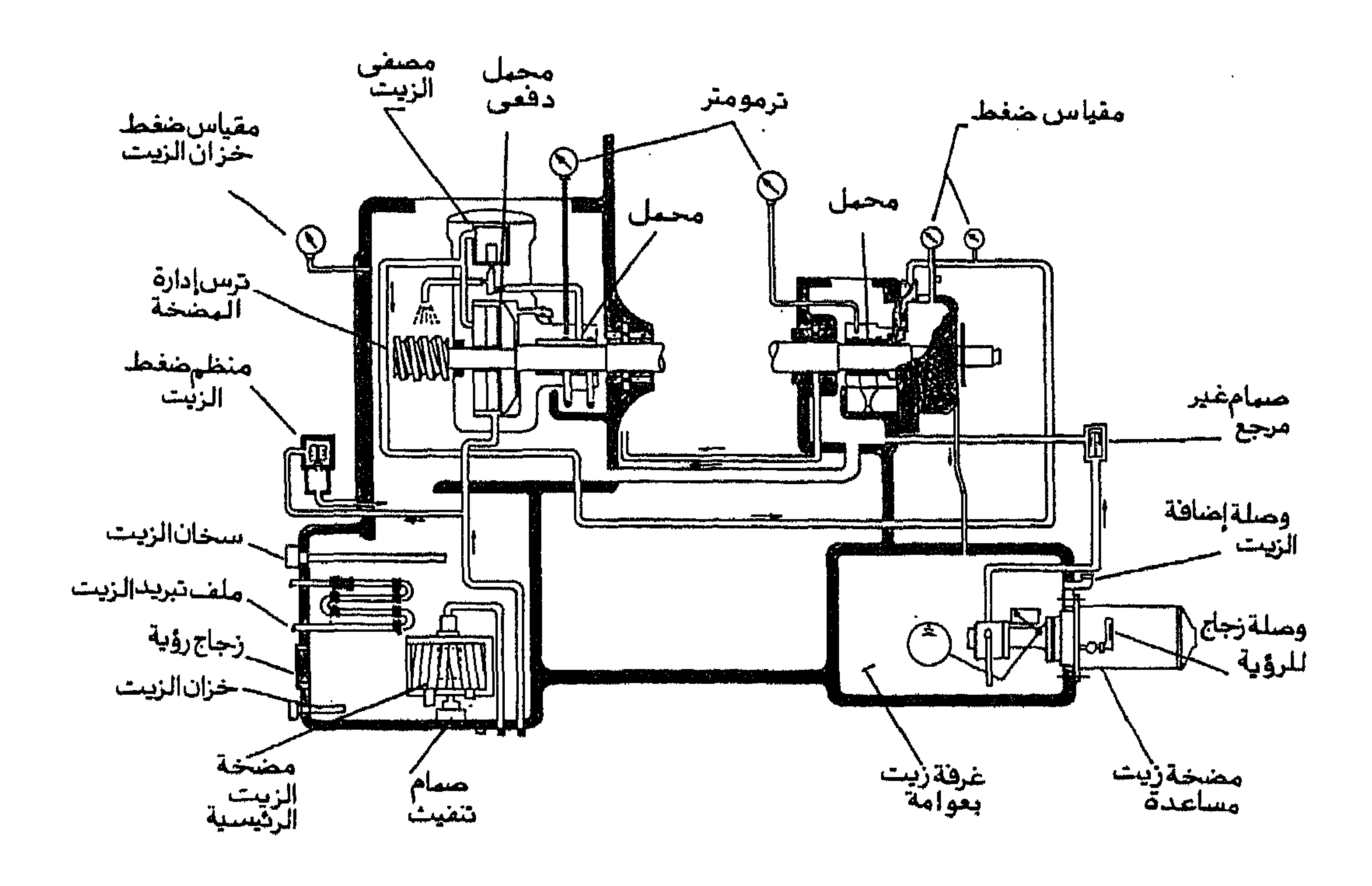
يحتاج ضاغط الطرد المركزي إلى تزييت أقل من ذلك المطلوب للضاغط الترددي حيث أن الأسطح المطلوب تزييتها في الأول أقل منها في الثاني . وتشمل الأماكن المطلوب تزييتها بضاغط الطرد المركزي الحامل ومانعات التسرب وتروس السرعات (إن وجدت) . وتستخدم ضواغط الطرد المركزي نظام داخلي أو خارجي للتزييت . ففي النظام الداخلي



شكل ٧.٧ مواقع تركيب مانع تسرب من نوع لابيرنث بين الأجزاء الدوارة والعلبة الحاوية بضاغط طرد مركزي [شركة يورك] .

يحوي جسم الضاغط خزان الزيت ومضخة الزيت وملحقاتها من مصفاة ومرشح الزيت وسخان الزيت ومبرد الزيت ، أما في النظام الخارجي للتزييت فتوضع مكونات النظام خارج جسم الضاغط . ويعتبر نظام التزييت الداخلي هو الأكثر شيوعاً نظراً لصغر حجمه وقلة تكاليفه بالمقارنة بنظام التزييت الخارجي .

ويوضح شكل ٧.٨ نظام تزييت داخلي حيث تدار مضخة التزييت المغمورة بمحور إدارة الضاغط . ويشمل النظام مضخة أخرى تدار بموتور خارجي وتعمل على إرجاع أي زيت زائد عن حاجة مانعات التسرب إلى خزان الزيت . كما يضم النظام أيضاً سخاناً للزيت وملف تبريد للزيت . ويعمل سخان الزيت فقط عند إيقاف الضاغط لمنع إرغاء الزيت عند بداية التشغيل ولرفع درجة حرارة الزيت إلى ٦٠ °م ، ولمزيد من التفصيل حول هذا الموضوع يمكن للقارئ الرجوع إلى الجزء ٥.٨ في الفصل الخامس . أما ملف



شكل ٧.٨ نظام تزييت داخلي لضاغط طرد مركزي [شركة كارير ١٩٧٧ ، كتالوج ٧١٤-٥٢١] .

تبريد الزيت ، فيعمل خلال دورة تشغيل الضاغط لتبريد الزيت إلى درجة الحرارة الموصى بها ، وذلك بغرض المحافظة على لزوجته إلى الحد المطلوب لإتمام عملية التزييت بكفاءة عالية .

٧.٥ القدرة اللازمة للانضغاط

هناك طريقتين لحساب القدرة اللازمة للانضغاط هما : فرض أن عملية الانضغاط

أيزنتروبية ، وفرض أن عملية الانضغاط بوليتروبية .

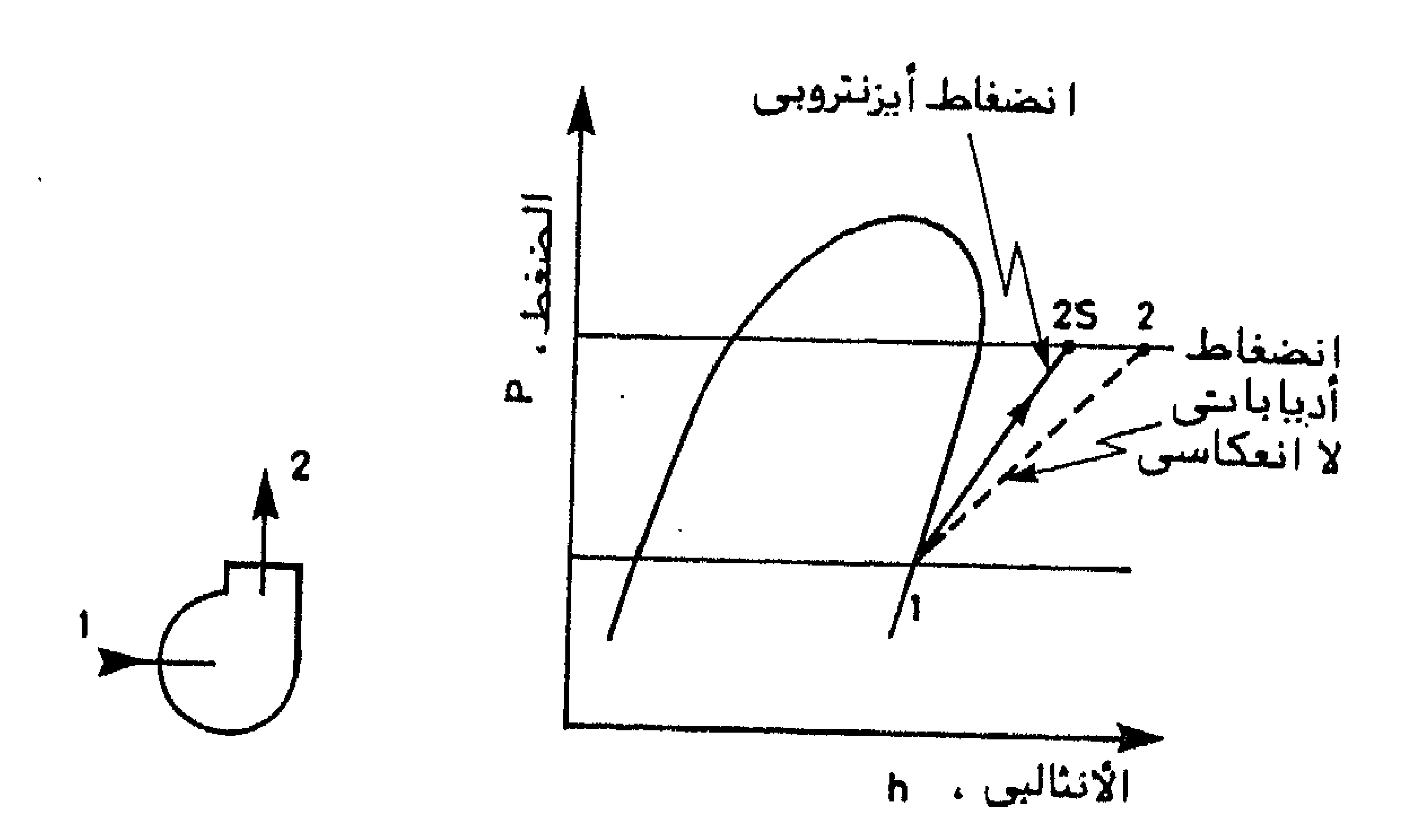
في الحالة الأولى ، بفرض أن عملية الانضغاط أيزنتروبية فإن القدرة اللازمة للانضغاط تُعْطَى كما يلي

$$\dot{W}_s = \dot{m} \ (h_{2s} - h_1) \tag{7.1}$$

حيث التذييل s يعني انضغاط أيزنتروبي (أي أدياباتي انعكاسي) ، والتذييلين ١ ، ٢ يعنيان عند دخول وخروج الضاغط كما هو مبين بشكل ٧.٩ ، و $\dot{m}$ هي معدل سريان المبرد خلال الضاغط . ونظراً لأنه لا يمكن عملياً إجراء عملية الانضغاط انعكاسياً ، فإن القدرة الفعلية لعملية الانضغاط الأدياباتية اللانعكاسية تعطى عندئذ كما يلي

$$\dot{W} = \dot{m} \ (h_2 - h_1)$$

$$= \frac{1}{\eta_s} \dot{m} \ (h_{2s} - h_1) \tag{7.2}$$



شكل ٧.٩ تمثيل الانضغاط الأيزنتروبي والانضغاط الأدياباتي اللانعكاسي على خريطة الضغط – إنثالبي .

وتعرف η_s بالكفاءة الأيزنتروبية ، وهي النسبة بين القدرة الأيزنتروبية اللازمة للانضغاط والقدرة الفعلية . وتتراوح قيمة η_s عادة بين ٠.٦٢ و ٠.٨٣ تبعاً للتطبيق المستخدم [أشراي ، ١٩٨٨] .

في الطريقة الثانية لحساب قدرة الانضغاط ، تُفْرَض عملية بوليتروبية انعكاسية بين حالة الدخول "١" وحالة الخروج "٢" وتتبع هذه العملية العلاقة الآتية

$$Pv^n = C' \tag{7.3}$$

حيث C' ثابت العملية و n هي مؤشر العملية البوليتروبية . عندئذ تكون قدرة الانضغاط لهذه العملية كما يلي

$$\dot{W}_p = \dot{m} \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \tag{7.4}$$

فإذا حادت عملية الانضغاط عن كونها بوليتروبية نظراً لأسباب عملية ، فإن قدرة الانضغاط الفعلية تعطى كما يلي

$$\dot{W} = \frac{1}{\eta_p} \dot{W}_p = \frac{\dot{m}}{\eta_p} \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \tag{7.5}$$

حيث η_p هي الكفاءة البوليتروبية لعملية الانضغاط وتتراوح قيمتها عملياً بين ٠.٧ و ٠.٨٤ ، وتفرض عادة حوالي ٠.٧٦ لأغراض التصميم [أشراي ١٩٨٨] .

ويلجأ العديد من المصممين عند حساب قدرة الانضغاط إلى فرض انضغاط أيزنتروبي باستخدام المعادلة ٧.٤ مع وضع قيمة n مساوية للمؤشر الأيزنتروبي γ ، بدلاً

من استخدام المعادلة ٧.١ . عندئذ تستخدم القيمة المتوسطة للمؤشر γ بين الحالتين "١" و "٢" ، والمعطاة بشكل ٥.٥ . وعليه تعطى قدرة الانضغاط في هذه الحالة كما يلي

$$\dot{W} = \frac{\dot{m}}{\eta_p} \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (7.6)$$

ويتسبب الاحتكاك عادة في زيادة هذه القدرة ، وتتراوح الكفاءة الميكانيكية η_m بين ٩٠٪ إلى ٩٩٪ ، وتؤخذ η_m حوالي ٩٧٪ لأغراض التصميم [أشراي ١٩٨٨] . وتكون القدرة اللازمة للموتور عندئذ كما يلي

$$\dot{W}_m = \frac{1}{\eta_m} \dot{W} \quad (7.7)$$

مثال ٧.١

ضاغط طرد مركزي يعمل بمبرد ١٢ بين مبخر ومكثف عند درجتي حرارة تشبع قدرهما -٥ و ٥٠ °م على التوالي ، احسب الشغل اللازم لانضغاط ١ كجم من بخار المبرد بفرض :

أ) عملية أيزنتروبية لها كفاءة أيزنتروبية قدرها ٠.٧٥ .

ب) عملية بوليتروبية لها مؤشر بوليتروبي قدره ١.١٣ ، وكفاءة بوليتروبية قدرها ٠.٧٦ .

جـ) عملية بوليتروبية لها مؤشر بوليتروبي مساو للمؤشر الأيزنتروبي المتوسط بين درجتي حرارة المبخر والمكثف .

الحل

من ملحق أ ، وباستخدام شكل ٧.٩ نجد أن ضغط المبخر = ٢٦١.٢ كيلوبسكال ،

وضغط المكثف = ١٢١٦,٧ كيلوبسكال ، وأنثالبي الدخول إلى الضاغط = ٣٥٠.٢٢ كيلوجول/كجم ، والحجم النوعي لبخار المبرد عند الدخول إلى الضاغط = ٠.٠٦٥٣١ م٣ /كجم ، كذلك بفرض عملية انضغاط أيزنتروبية ، فإن أنثالبي الخروج من الضاغط = ٣٨٠ كيلوجول/كجم .

أ) من معادلة ٧.٢ نجد أن

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \frac{1}{0.76}\ (380\ -\ 350.22)\ =\ 39.7\ \ kJ/kg$$

ب) من معادلة ٧.٥ نجد أن

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \frac{1}{0.75} \times \frac{1.13}{0.13} \times 261.2 \times 0.06531 \times \left[\left(\frac{1216.7}{261.2}\right)^{0.13/1.13} -1\right]$$

$$= 37.8\ \ kJ/kg$$

جـ) من شكل ٥.٥ القيمة المتوسطة للمؤشر الأيزنتروبي γ بين درجتي حرارة التشبع بالمبخر والمكثف هي ١.٠٥ ، عندئذ تعطي معادلة ٧.٦ الآتي

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \frac{1}{0.76} \times \frac{1.05}{0.05} \times 261.2 \times 0.06531 \times \left[\left(\frac{1216.7}{261.2}\right)^{0.05/1.05} -1\right]$$

$$= 35.8\ \ kJ/kg$$

٧.٦ حساب ضغط الخروج لضاغط الطرد المركزي

يدخل بخار المبرد إلى عين الدفاعة في اتجاه محوري فتعمل الدفاعة على سريان

هذا البخار في اتجاه إشعاعي ، مع حركة دورانية مصاحبة ، إلى خارج الدفاعة كنتيجة لقوة الطرد المركزية ، مما يؤدي إلى ارتفاع ضغط البخار وسرعته . وبتطبيق قاعدة كمية الحركة في اتجاه دوران الدفاعة ، فإن عزم الدوران للدفاعة يكون كما يلي

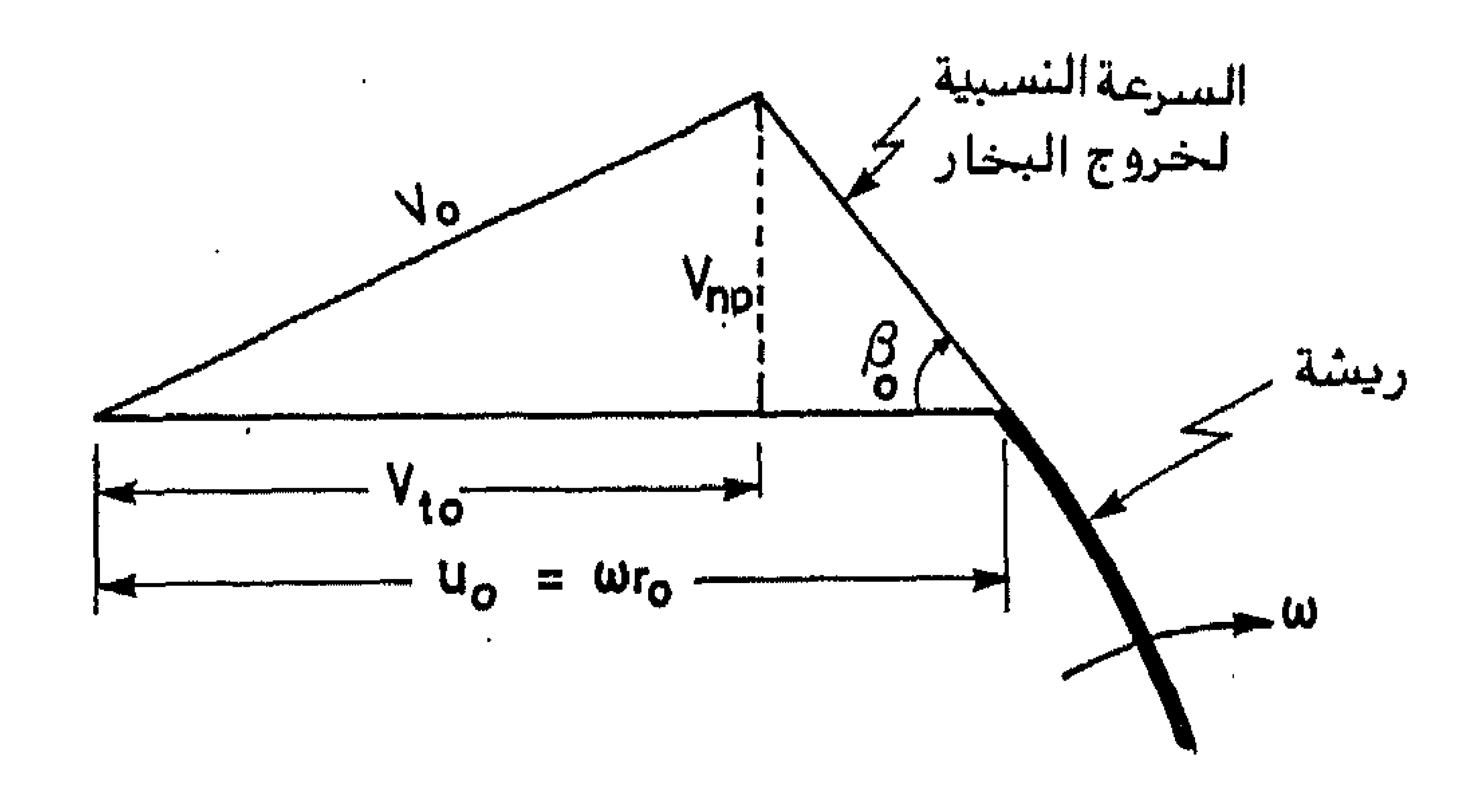
$$T_r = \dot{m} (V_{to} r_o - V_{ti} r_i) \tag{7.8}$$

حيث r_i و r_o هما نصفا قطر الدفاعة عند الدخول والخروج على التوالي ، و V_{ti} و V_{to} هما على التوالي سرعتي بخار المبرد في اتجاه التماس للدفاعة عند الدخول والخروج ، و $\dot{m}$ هي معدل سريان بخار المبرد خلال الدفاعة . وبفرض أن البخار يدخل الدفاعة في اتجاه محوري فقط ، أي أن V_{ti} تساوي صفراً ، وهو فرض صحيح عملياً ، فإن عزم الدوران للدفاعة يصبح

$$T_r = \dot{m} r_o V_{to} \tag{7.9}$$

وبرسم مثلث السرعات عند الخروج من الدفاعة كما في شكل ٧.١٠ ، فإن المركبة المماسية لسرعة خروج بخار المبرد تكون كما يلي

$$V_{to} = u_o - V_{no} \cot \beta_o \tag{7.10}$$



شكل ٧.١٠ مثلث السرعات عند خروج بخار المبرد من الدفاعة .

حيث V_{no} هي المركبة الإشعاعية لسرعة خروج بخار المبرد من الدفاعة ، و u_o هي سرعة دوران طرف الدفاعة الخارجي ، و β_o هي زاوية ميل أرياش الدفاعة عند الخروج . هذا ، ولقد فرض في المعادلة السابقة أن السرعة النسبية لخروج البخار بالنسبة للدفاعة تكون في اتجاه المماس للدفاعة . فإذا كان سمك الدفاعة b والحجم النوعي للبخار عند الخروج من الدفاعة هو v_2 ، فإن مركبة السرعة V_{no} تعطى كما يلي

$$V_{no} = \frac{\dot{m}\ v_2}{2\ \pi\ r_o\ b} \tag{7.11}$$

وذلك بإهمال سمك أرياش الدفاعة . وتؤول المعادلة ٧.١٠ عندئذ إلى الآتي

$$V_{to} = \omega\ r_o - \frac{\dot{m}\ v_2}{2\ \pi\ r_o\ b}\ \cot\beta_o \tag{7.12}$$

حيث ω هي سرعة دوران الدفاعة . وباستخدام معادلة ٧.٩ ومعادلة ٧.١٢ تُعْطَى القدرة المنقولة من الدفاعة إلى البخار عندئذ كما يلي

$$\dot{W} = \omega\ T_r$$

$$= \dot{m}\ \ \omega\ r_o\ (\ \omega\ r_o - \frac{\dot{m}\ v_2}{2\ \pi\ r_o\ b}\ \cot\beta_o\ ) \tag{7.13}$$

وبمساواة هذه القدرة بالقيمة المعطاه بالمعادلة ٧.٦ - بفرض أن عملية الانضغاط بوليتروبية - وإجراء التحويرات المطلوبة ، نحصل على الآتي

$$\frac{P_2}{P_1} = \left[\ \eta_p\ \frac{n-1}{n}\ \frac{r_o\omega}{P_1 v_1}\ (\omega\ r_o - \frac{\dot{m}\ v_2}{2\ \pi\ r_o\ b}\ cot\ \ \beta_o) + 1\ \right]^{n/(n-1)} \tag{7.14}$$

ويتضح من المعادلة السابقة ارتفاع نسبة ضغط الطرد إلى ضغط السحب بضاغط الطرد المركزي بزيادة سرعة دوران الدفاعة ω ، أو نصف قطرها الخارجي r_o ، أو كليهما .

مثال ٧.٢

ضاغط طرد مركزي له نصف قطر دفاعة قدره ١٥ سم ، وله سرعة دوران قدرها ١٥٠٠٠ لفة/دقيقة ، يستخدم لضغط مبرد ١٢ بمعدل قدره ١٠ كجم/ث بعملية بوليتروبية بمؤشر بوليتروبي قدره ١.١٣ ، وكفاءة بوليتروبية قدرها ٠.٧٦ . عند درجة حرارة تشبع قدرها – ٥°م . تحوي دفاعة الضاغط أرياشاً خلفية الانحناء بزاوية قدرها ٦٠° عند الخروج من الدفاعة ، وكان سمك ممر الخروج من الدفاعة حوالي ٠.٥ سم . احسب

أ) ضغط الخروج من الضاغط

ب) مركبة سرعة خروج البخار من الدفاعة ، في اتجاه تماس الدفاعة

جـ) القدرة المبذولة لانضغاط البخار

د) سرعة الدوران الموصى بها للضاغط إذا عمل الضاغط مع مكثف له درجة حرارة تشبع قدرها ٥٠ °م .

الحل

من معطيات المثال تعطى سرعة الدوران كما يلي

$$\omega = \frac{2\,\pi}{60} \times 15000 = 1570.8 \quad \text{rad/s}$$

من ملحق أ نجد أن ضغط البخار عند دخول الضاغط = ٢٦١.٢ كيلوبسكال ، وحجمه النوعي عند الدخول = ٠.٠٦٥٣١ م^3/كجم .

أ) لحساب نسبة ضغط الخروج من الضاغط إلى ضغط الدخول إليه من معادلة ٧.١٤ ، يلزم معرفة الحجم النوعي v_2 عند الخروج من الدفاعة . ويعتمد هذا الحجم النوعي بدوره على نسبة الضغط تبعاً للعلاقة الخاصة بعملية انضغاط بوليتروبي ، أي أن

$$v_2 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-1/n} v_1$$

مما يعني أن الحساب يتطلب محاولة وخطأ ، ويتم هذا كما يلي . نفرض نسبة انضغاط قدرها ٥ ، أي أن

$$v_2 = 5^{-1/1.13} \times 0.06531 = 0.0157 \quad m^3 / kg$$

من معادلة ٧.١٤ نجد أن

$$\frac{P_2}{P_1} = [\ 0.76 \times \frac{0.13}{1.13} \times \frac{0.15 \times 1570.8}{261.2 \times 10^3 \times 0.06531} (1570.8 \times 0.15$$

$$- \frac{10 \times 0.0157}{2\ \pi \times 0.15 \times 0.005} \cot 60\ ) + 1\ ]^{1.13/0.13} = 7.52$$

نحسب عندئذ القيمة الجديدة للحجم النوعي عند الخروج . ويوضح الجدول التالي نتائج المحاولات والخطأ .

$\frac{P_2}{P_1}$	فرضاً	٥	٧.٥٢	٧.٨٩	٧.٩٣
v_2	حسابياً ، م٣/كجم	٠.٠١٥٧	٠.٠١١٠	٠.٠١٠٥	٠.٠١٠٥
$\frac{P_2}{P_1}$	من معادلة ٧.١٤	٧.٥٢	٧.٨٩	٧.٩٣	٧.٩٤

ب) من معادلة ٧.١٢ نجد أن

$$V_{to} = 1570.8 \times 0.15 - \frac{10 \times 0.0105}{2\ \pi \times 0.15 \times 0.005} \cot 60 = 222.8 \quad m/s$$

جـ) من معادلة ٧.٩ ومعادلة ٧.١٣ نجد أن

$$\dot{W} = \dot{m}\, r_o\, V_{to}\, \omega$$

$$= 10 \times 0.15 \times 222.8 \times 1570.8 = 525 \quad \text{kW}$$

د) من ملحق أ نجد أن ضغط المكثف = ١٢١٦.٧ كيلوبسكال . أي أن نسبة الانضغاط للضاغط يجب أن تساوي ٤.٦٦ . عندئذ يحسب الحجم النوعي للبخار الخارج من الدفاعه كما يلي

$$v_2 = (4.66)^{-1/1.13} \times 0.06531 = 0.0167 \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

تحسب سرعة الدوران ω من معادلة ٧.١٤ بالمحاولة والخطأ بحيث تعطي المعادلة نسبة انضغاط مساوية ٤.٦٦ ، ويوضح الجدول الآتي نتائج الحسابات .

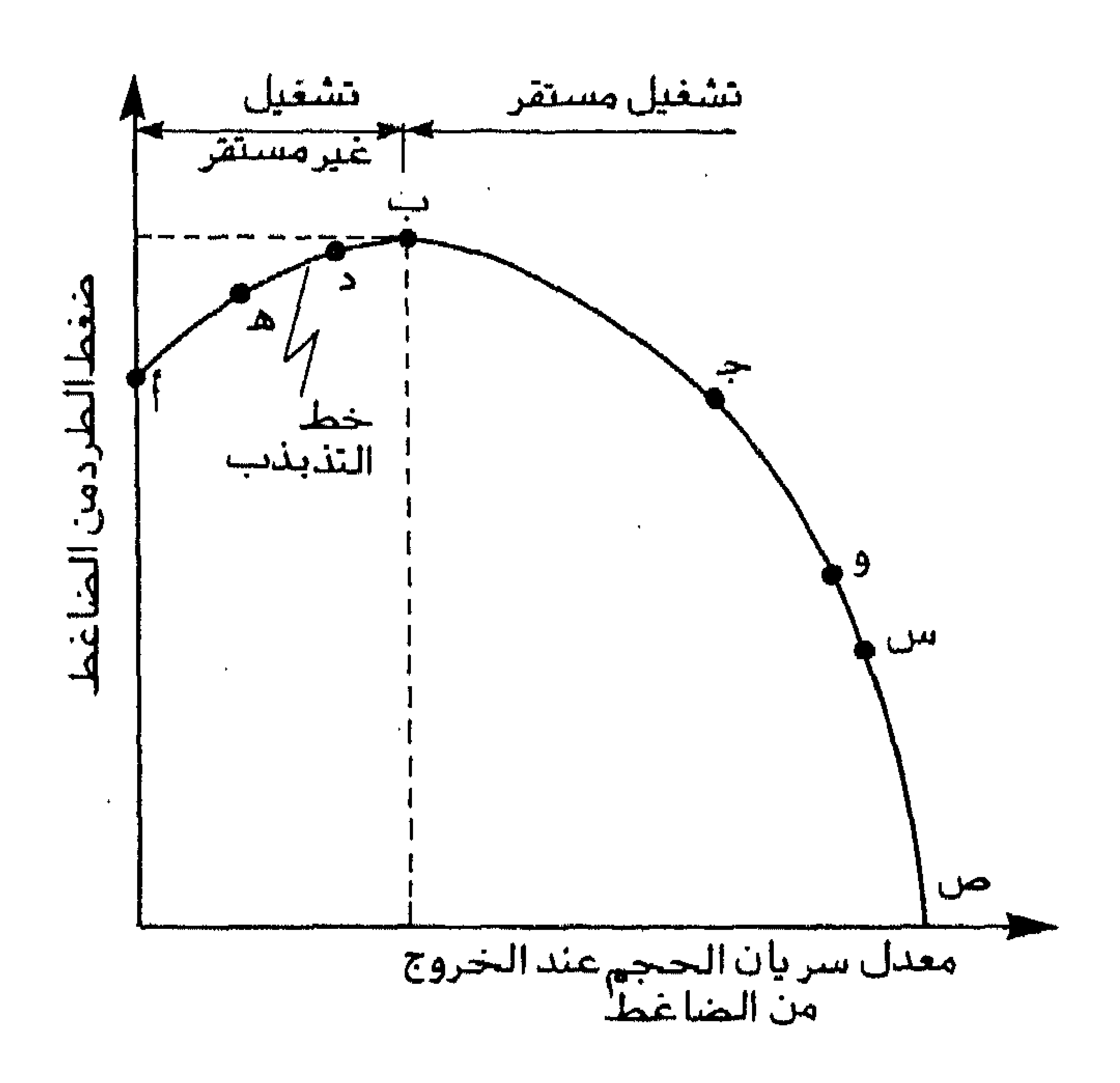
ω فرضاً	١٥٠٠	١٠٠٠	١٣٠٠	١٣٥٠	١٣٦٦
$\frac{P_2}{P_1}$ من معادلة ٧.١٤	٦.٣٠	٢.٢٨	٤.٠٤	٤.٥٠	٤.٦٦

أي أن سرعة الدوران المطلوبة هي ١٣٦٦ زاوية نصف قطرية /ث أي حوالي ١٣.٤٤ لفة / دقيقة .

٧.٧ الأداء المتذبذب لضاغط الطرد المركزي

تمثل معادلة ٧.١٤ أفضل تغير ممكن نظرياً لضغط الطرد P_2 مع معدل سريان الحجم عند الخروج من الضاغط $\dot{m}\, v_2$. وبفحص هذه المعادلة نجد أن ضغط الطرد من الضاغط يتناسب عكسياً مع معدل سريان الحجم عند الخروج من الضاغط ، أي أنه بزيادة $\dot{m}\, v_2$ يقل P_2 . وقد لوحظ عملياً عدم تحقق هذه المعادلة نتيجة الاحتكاك بين سريان المبرد

وأسطح أرياش الدفاعة ، وكذلك نتيجة السريان الثانوي داخل الدفاعة ، وحيود سرعة الخروج النسبية للبخار عند وضع التماس للأرياش عند الخروج ، ولغيرها من الأسباب . عندئذ تقل قيمة P_2 الفعلية عن تلك المعطاه بالمعادلة ٧.١٤ ، ويصبح تغيرها مع معدل السريان عند الخروج كما هو معطى بالمنحنى الموضح بشكل ٧.١١ . فكما هو موضح بالشكل يزيد الضغط P_2 بزيادة معدل السريان $m\ v_2$ بدء من السكون عند الحالة "أ" إلى أقصى ضغط ممكن عند النقطة "ب" ، بعدئذ يقل الضغط بزيادة معدل السريان . وتقسم الحالة "ب" المنحنى إلى جزئين أساسيين : الجزء الأيمن للحالة "ب" ، ويعرف بالتشغيل المستقر للضاغط ، والجزء الأيسر للحالة "ب" ، ويعرف بالتشغيل غير المستقر للضاغط .



شكل ٧.١١ المنحنى المميز لتغير ضغط الطرد مع معدل سريان الحجم عند الخروج من ضاغط طرد مركزي.

في الجزء الأيمن تمثل الحالة "جـ" حالة نمطية للتشغيل ، فعند هذه الحالة يكون تشغيل الضاغط مستقر ، فإذا زاد معدل السريان قليلاً عن القيمة المناظرة للحالة "جـ" زاد فقد الضغط الناتج عن الاحتكاك بالنظام المصاحب للضاغط ، مما يؤدي إلى ارتفاع ضغط الطرد P_2 بالنظام وهذا بدوره يعيد تشغيل الضاغط مرة أخرى عند الحالة "جـ" . أما إذا عمل الضاغط عند نقطة مثل "د" فإنه إذا قل معدل السريان بالنظام ، قل فقد الضغط الناتج عن الاحتكاك بالنظام ، فانخفض الضغط P_2 نسبياً بالنظام مما يعني ضرورة تحرك حالة تشغيل الضاغط إلى النقطة "هـ" . ويستمر هذا التحرك لحالة التشغيل مرة أخرى إذا انخفض معدل السريان ، حتى يصل الضاغط إلى حالة التوقف التام لحظياً عند الحالة "أ" . عند هذه الحالة يسري سريان معاكس إلى الضاغط من الضغط المرتفع بالمكثف إلى الضغط المنخفض داخل الضاغط . ويناظر هذا السريان القيمة المعطاه للحالة "و" مثلاً ، مما يؤدي إلى عمل الضاغط فجأة عند هذه الحالة ، فيسبب هذا ارتفاعاً بضغط النظام نتيجة زيادة فقد ضغط احتكاك السريان فجأة ، إلى قيمة تناظر الضغط عند الحالة "د" (غير المستقرة مرة أخرى) . ويتكرر هذا الأداء للضاغط ما بين التوقف اللحظي عند الحالة "أ" إلى العمل فجأة عند الحالة "و" فالحالة "د" . ويعرف هذا الأداء للضاغط بالأداء المتذبذب (أداء التمور للضاغط) . ويحدث ذلك الأداء المتذبذب بالضاغط إذا زادت نسبة انضغاط الغاز بالضاغط بدرجة ملحوظة عن قيمة التصميم ، نتيجة ارتفاع ضغط المكثف أو انخفاض ضغط المبخر . ويصاحب هذا الأداء عادة ضوضاء شديدة ، فإذا استمر لفترة طويلة نتج عن هذا الأداء تسخين زائد قد يسبب تلف الحامل وبعض الأجزاء الأخرى بالضاغط والنظام المتصل به .

ويمكن عند التشغيل التمييز بين الضوضاء الناتجة عن السريان المتذبذب وغيرها من الضوضاء بملاحظة تحميل موتور أو توربين إدارة الضاغط ، فإذا صاحب هذه الضوضاء تحميل ولاتحميل الموتور أو التوربين كانت هذه الضوضاء نتيجة السريان المتذبذب للضاغط ، وينصح عندئذ بتغير نقطة تشغيل الضاغط إلى الجزء المستقر من المنحنى المميز

للأداء .

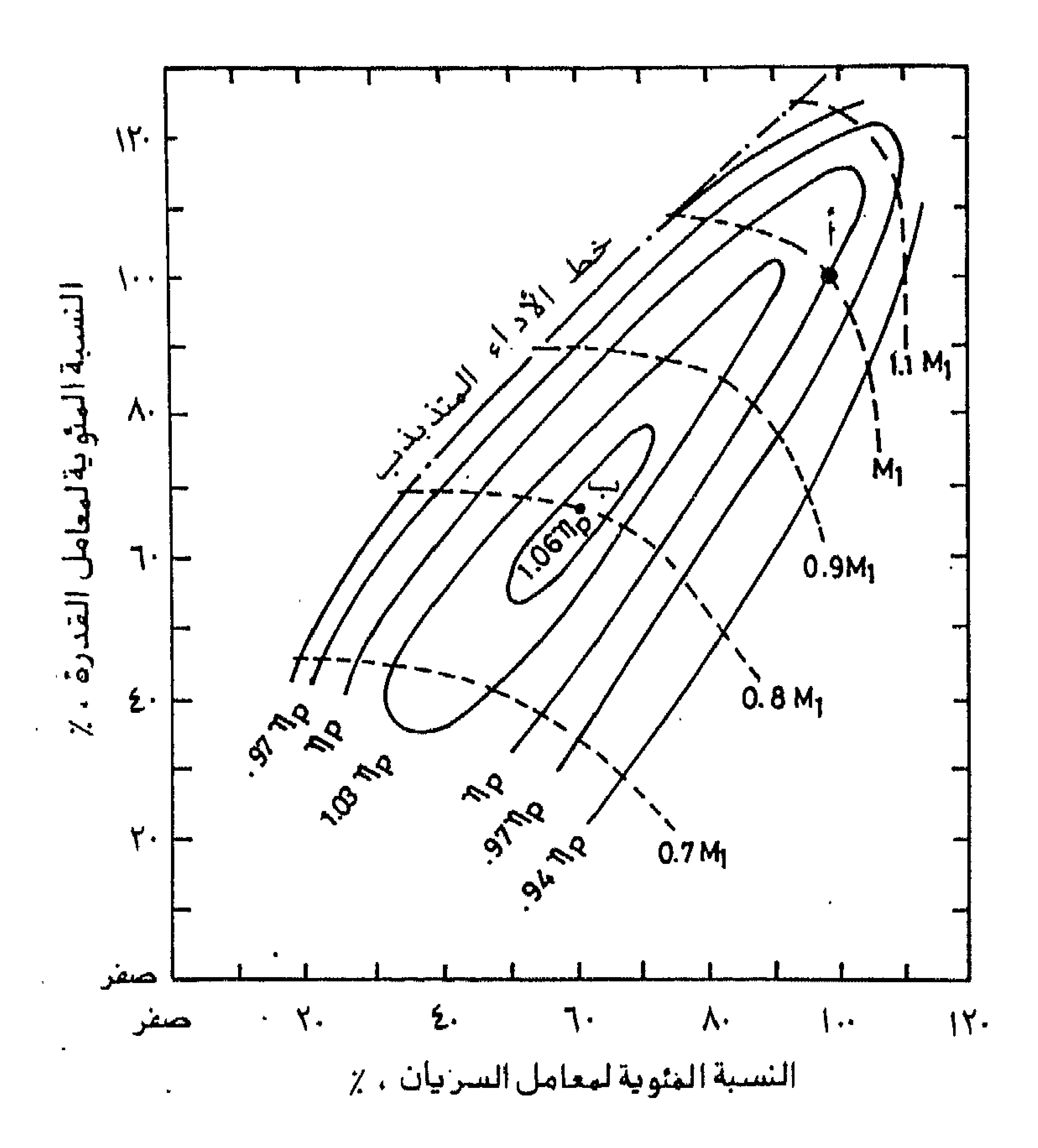
ويُفَضّل عادة اختيار نقطة تصميم أداء الضاغط في الجزء المستقر من المنحنى المميز لأداء الضاغط (شكل ٧.١١) . كما يفضل أن تكون نقطة الأداء المختارة عند أكبر معدل سريان بالحجم ، إلا أنه يجب مراعاة الابتعاد عن الجزء س – ص في أقصى يمين المنحنى حيث ينخفض ضغط الطرد سريعاً بمجرد أي زيادة في معدل حجم السريان . وينتج هذا عن الزيادة الكبيرة في فقد ضغط الاحتكاك وفقد الضغط في السريان الثانوي عند هذه المعدلات الكبيرة لمعدل سريان الحجم . وبالطبع تنخفض كفاءة الضاغط في هذا الجزء من المنحنى المميز إلى قيم متدنية لا يصلح معها الضاغط للعمل بطريقة اقتصادية . ويعرف هذا الجزء من المنحنى المميز – من نقطة "س" إلى نقطة "ص" – بأداء السريان المخنوق .

٧.٨ أداء ضاغط الطرد المركزي عند ظروف تشغيل مختلفة

يبين شكل ٧.١٢ المنحنيات المميزة لأداء أحد ضواغط الطرد المركزي ويمثل المحور الأفقي بالشكل النسبة المئوية لمعامل السريان ، وهي نسبة معامل السريان θ إلى قيمته المرجعية θ^* عند ظروف تشغيل مرجعية . كما يمثل المحور الرأسي بالشكل النسبة المئوية لمعامل القدرة ، وهي نسبة معامل القدرة Ω إلى قيمته المرجعية Ω^* عند نفس ظروف التشغيل المرجعية السابقة . ويعرف معاملا السريان والقدرة كما يلي :

$$\theta = \frac{(\dot{m}\, v_o)_1}{a_1\, D_1^2} \tag{7.15}$$

$$\Omega = \frac{g\, \dot{W}_p}{\dot{m}\, a_1^2} \tag{7.16}$$



شكل ٧.١٢ المنحنيات المميزة لأداء أحد ضواغط الطرد المركزي [الأشراي ، ١٩٨٨] .

حيث a_1 هي سرعة الصوت عند ظروف الدخول إلى الدفاعة الأولى، و D_1 هي قطر الدفاعة الأولى و $(\dot{m}\, v_0)_1$ هي معدل سريان حجم الخروج من الدفاعة الأولى ، و g هي عجلةالجاذبية الأرضية ، و $\dot{W}_p$ هي قدرة التشغيل لانضغاط بوليتروبي كما هو معطى بمعادلة ٧.٤ . وتمثل المنحنيات المبينة بالشكل تغير النسبة المئوية لمعامل القدرة مع النسبة المئوية لمعامل السريان لعدة سرعات دوران ، معطاه بدلالة رقم ماخ للدفاعة الأولى

M_1 وبدلالة كفاءة الضاغط η_p . ويعرف رقم ماخ للدفاعة الأولى بأنه نسبة سرعة طرف الدفاعة الأولى إلى سرعة الصوت عند الظروف المرجعية لدخول الدفاعة الأولى ، أي أن

$$M_1 = \frac{u_1}{a_1} = \frac{\omega D_1}{2\ a_1} \tag{7.17}$$

أما كفاءة الضاغط η_p المبينة بالشكل فهي الكفاءة البوليتروبية المعرفة بالمعادلة ٧,٥ عند نفس الظروف المرجعية . ويفضل عادة تشغيل الضاغط أقرب ما يمكن من منطقة أعلى كفاءة ممكنة حتى يكون عمل الضاغط اقتصادياً .

ويمثل الحد الأيسر للمنحنيات خط الأداء المتذبذب للضاغط الذي قُدِّمَ في الجزء السابق . ويبين جدول ٧,١ سرعة الصوت (متر/ثانية) عند درجات حرارة تشبع مختلفة لبعض المبردات [أشراي ، ١٩٨٨] .

جدول ٧,١ سرعة الصوت في البخار المشبع لبعض المبردات [أشراي ، ١٩٨٨] .

المبرد	سرعة الصوت م/ث عند درجات حرارة تشبع مختلفة (°م)				
	-٨٠ °م	-٥٠ °م	-٢٠ °م	١٠ °م	٤٠ °م
مبرد ١٢	١٢٤	١٣٠	١٣٥	١٣٦	١٣٣
مبرد ٢٢	١٥٠	١٥٨	١٦٢	١٦٣	١٥٨
أمونيا	٣٥٤	٣٧٧	٣٩٨	٤٠٨	٤١٣

وتمثل النقطة " أ " بشكل ٧.١٢ ظروف التشغيل المرجعية للضاغط حيث تكون النسبة لمعاملي السريان والقدرة ١٠٠٪ ، ويكون رقم ماخ يساوي M_1 . فإذا تغيرت ظروف التشغيل عن الظروف المرجعية ، تغير أداء الضاغط تبعاً لهذه المنحنيات . وتوفيراً للطاقة يفضل اختيار نقطة التصميم "ب" بالشكل عند موضع أكبر كفاءة ممكنه ، عندئذ يعمل الضاغط برقم ماخ حوالي ٨٠٪ من القيمة المرجعية M_1 ، وبمعامل سريان قدره ٦٠٪ من القيمة المرجعية θ^* ، وبمعامل قدره حوالي ٦٧٪ من القيمة المرجعية Ω^* .

ويوضح المثالان التاليان استخدام الخريطة المعطاه بشكل ٧.١٢ لتوصيف أداء الضاغط .

مثال ٧.٣

ضاغط طرد مركزي يدور بسرعة دوران قدرها ١٥٠٠٠ لفة/دقيقة وله دفاعه واحدة قطرها ٢٥ سم ، يعمل الضاغط بمبرد ١٢ عند الظروف المرجعية الآتية :

- درجتي حرارة تشبع بالمبخر والمكثف قدرهما -٢٠ °م و ٥٠ °م ، على التوالي
- معدل سريان كتله قدره ١٠ كجم/ث
- مؤشر بوليتروبي لعملية الانضغاط قدره ١.١٤ .

إذا كان الضاغط يعمل تبعاً للمنحنيات المميزة المعطاه بشكل ٧.١٢ ، أوجد :

أ) معامل السريان المرجعي للضاغط

ب) معامل القدرة المرجعي للضاغط

جـ) رقم ماخ لدفاعة الضاغط عند سرعة الدوران المرجعية .

الحل

أ) من ملحق " أ " نجد أن الحجم النوعي عند الدخول إلى الضاغط = ٠.٠١٠٩٢٩ م^3/كجم ، وضغط الدخول = ١٥١.٠ كيلو بسكال وضغط الخروج = ١٢١٦.٧ كيلو بسكال . يُحْسَب

الحجم النوعي عند الخروج من الضاغط كما يلي

$$v_o = 0.10929 \left(\frac{151}{1216.7} \right)^{1/1.14} = 0.0175 \quad m^3/kg$$

من جدول ٧.١ نجد أن سرعة الصوت عند دخول الضاغط = ١٣٥ م/ث . من معادلة ٧.١٥ نحسب معامل السريان المرجعي كما يلي

$$\theta^* = \frac{10 \times 0.0175}{135 \times (0.25)^2} = 0.021$$

ب) من معادلة ٧.٤ تحسب قدرة التشغيل كما يلي

$$\dot{W}_p = 10 \times \frac{1.14}{0.14} \times 151 \times 0.10929 \left[\left(\frac{1216.7}{151} \right)^{0.14/1.14} - 1 \right] = 392.5 \quad kW$$

ويحسب معامل القدرة المرجعي من معادلة ٧.١٦ كما يلي

$$\Omega^* = \frac{9.81 \times 392.5}{10 \times (135)^2} = 0.021$$

جـ) يحسب رقم ماخ لدفاعة الضاغط من معادلة ٧.١٧ كما يلي

$$M_1 = \frac{15000 \times 2\pi \times 0.25}{60 \times 2 \times 135} = 1.45$$

مثال ٧.٤

إذا كان شكل ٧.١٢ يمثل المنحنيات المميزة لأداء الضاغط المعطى بمثال ٧.٣ ، أوجد الآتي لنقطة التصميم "ب" على الشكل :

أ) سرعة دوران الضاغط

ب) معدل سريان الحجم الذي يناوله الضاغط

جـ) قدرة التشغيل الفعلية للضاغط .

افرض كفاءة بوليتروبية قدرها ٧٦ . ٠ لعملية الانضغاط .

الحل

نستخدم نتائج المثال السابق في حل المثال الحالي .

أ) من شكل ١٢ . ٧ نجد أن رقم ماخ M_B للدفاعه عند الحالة "ب" ، ثم من معادلة ١٧ . ٧ نجد سرعة الدوران كما يلي

$$0.8 = \frac{M_B}{M_1} = \frac{N_B}{N^*}$$

ومنها نجد أن

$$N_B = 0.8 \times 15000 = 12000 \quad \text{rpm}$$

ب) من شكل ١٢ . ٧ نجد أن نسبة معامل السريان عند نقطة "ب" = ٦ . ٠ أي أن

$$\theta_B = 0.6 \times \theta^* = 0.6 \times 0.021 = 0.0126$$

ومن معادلة ١٥ . ٧ نجد معدل سريان الحجم الذي يناوله الضاغط كما يلي

$$\dot{m}\, v_o = 135 \times (0.25)^2 \times 0.0126 = 0.1063 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

جـ) من شكل ١٢ . ٧ نجد أن نسبة معامل القدره = ٦٧ . ٠ ، أي أن

$$\Omega_B = 0.67 \times \Omega^* = 0.67 \times 0.021 = 0.0141$$

ومن معادلة ١٦ . ٧ نجد أن

$$\dot{W}_p = \frac{0.1063}{0.0175} \times (135)^2 \times \frac{0.0141}{9.81} = 159.12 \quad \text{kW}$$

حيث استخدمت قيمة الحجم النوعي عند الخروج من الضاغط من المثال السابق . ومن

شكل ٧.١٢ نجد أن الكفاءة البوليتروبية تساوي حوالي ١.٠٩ من قيمتها المرجعية ، أي أن

$$\eta_p = 1.09 \times 0.76 = 0.828$$

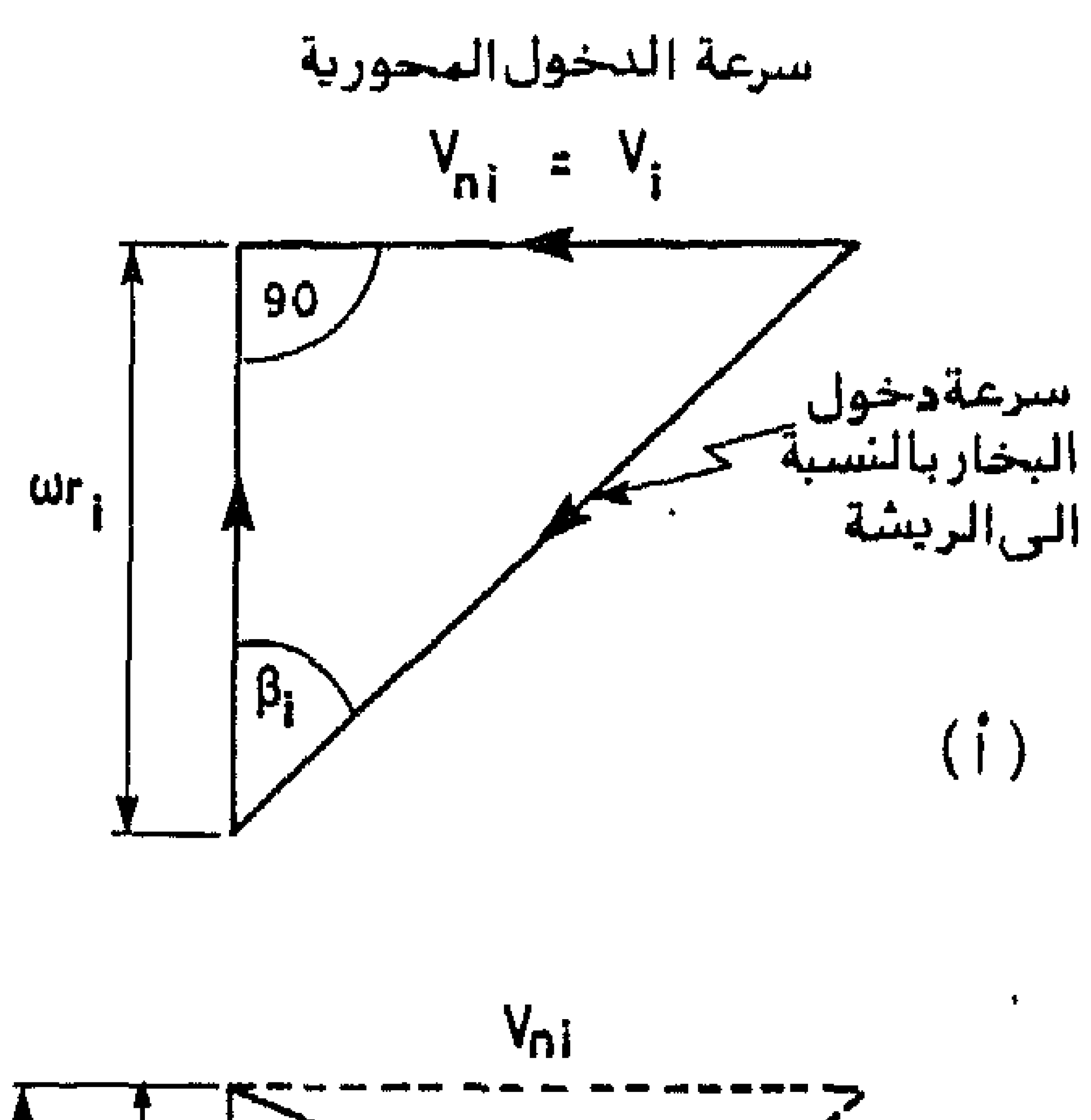
وعليه تقدر قدرة التشغيل الفعلية كما يلي

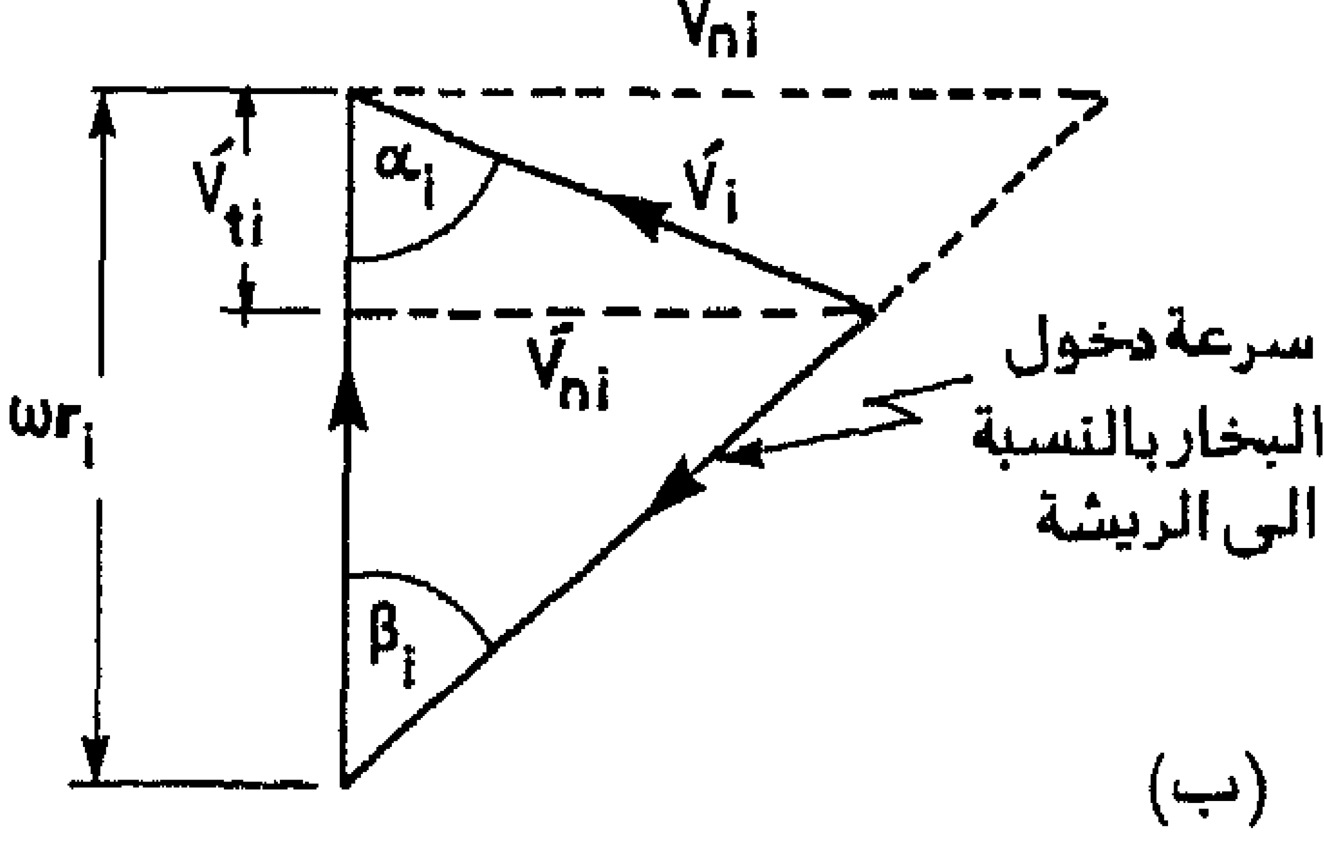
$$W = \frac{1}{0828} \times 159.12 = 192.2 \quad \text{kW}$$

٧.٩ التحكم في سعة تبريد ضواغط الطرد المركزي

يتم التحكم في سعة تبريد ضواغط الطرد المركزي عادة بالتحكم في زاوية دخول البخار إلى الدفاعة ، أو بالتحكم في سرعة دوران الدفاعه ، والطريقة الأولى هي الأكثر شيوعاً . كما تستخدم أيضاً في بعض الحالات الطرق الأخرى المعتادة للتحكم في سعة تبريد الضواغط الترددية ، مثل طريقة الخنق ، وطريقة تجنيب الغاز الساخن ، التي قدمناهما سابقاً في الفصل الخامس ، إلا أن معظم مصنعي ضواغط الطرد المركزي يفضلون التحكم في سعة التبريد بالتحكم في زاوية دخول البخار إلى الدفاعة أو التحكم في سرعة دوران الدفاعة.

تبين الحالة (أ) من شكل ٧.١٣ مثلث السرعات عند الدخول إلى الدفاعة . وتمثل V_i في الشكل سرعة الدخول إلى الدفاعة وهي في اتجاه محور الضاغط وليس بها أي مركبة في اتجاه التماس للدفاعة . ومن المثلث نجد أن سرعة الدخول النسبية تصنع زاوية β_i – أي زاوية ميل أرياش الدفاعة عند الدخول – مع السرعة المماسة لطرف الدفاعة ωr_i ، حيث ω هي سرعة دوران الدفاعة و r_i هي نصف قطرها الداخلي . وتمثل الحالة (ب) من





شكل ٧.١٣ مثلث السرعات عند دخول بخار المبرد إلى الدفاعة . (أ) بدون استخدام أرياش توجيه (أو أرياش التوجيه مفتوحة تماماً) ، (ب) باستخدام أرياش توجيه للحصول على مركبة لسرعة الدخول في اتجاه التماس للدفاعة.

شكل ٧.١٣ مثلث السرعات عند استخدام أرياش توجيه قبل الدخول إلى عين الدفاعة . وتعمل هذه الأرياش على انحراف سرعة الدخول V'_i عن الاتجاه المحوري ، فتميل بزاوية α_i عن اتجاه التماس للدفاعة مما يسبب دخول بخار المبرد إلى الدفاعة بمركبة سرعة V'_{ti} في اتجاه المماس للدفاعة . ومن تشابه المثلثات في الحالة (ب) في الشكل نجد أن

$$\frac{V'_{ni}}{V_{ni}} = \frac{\omega r_i - V'_{ni} / \tan \alpha_i}{\omega r_i} \tag{7.18}$$

ومنها ينتج

$$\frac{V'_{ni}}{V_{ni}} = \frac{\omega r_i}{\omega r_i + V_i / \tan \alpha_i} \tag{7.19}$$

ويحسب معدل دخول الكتلة إلى الضاغط كما يلي

$$\dot{m} = V_{ni} A_i / v_i \tag{7.20}$$

حيث V_{ni} هي مركبة سرعة الدخول في اتجاه المحور و v_i هي الحجم النوعي عند حالة الدخول إلى عين الدفاعة ، و A_i هي مساحة السريان لعين الدفاعة . ومن المعادلتين ٧.١٩ و ٧.٢٠ تعطي نسبة السريان ، وبالتالي نسبة سعة التبريد ، عند تغيير زاوية توجيه الأرياش من ٩٠ (عند فتح الريش كلياً) إلى α_i كما يلي *

$$\frac{\dot{Z}'}{\dot{Z}} = \frac{\dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{\omega r_i}{\omega r_i + V_i / \tan \alpha_i} \tag{7.21}$$

حيث $\dot{Z}$ و $\dot{Z}'$ هما على التوالي سعة التبريد عند فتح أرياش التوجيه كلية ، وبزاوية α_i على التوالي .

يتضح مما سبق أنه بانخفاض الزاوية α_i تزيد مركبة سرعة الدخول في اتجاه المماس للدفاعة مما يقلل من معدل السريان وبالتالي يقلل سعة التبريد للضاغط . ويؤدي انخفاض الزاوية α_i أيضاً إلى تقليل القدرة اللازمة للانضغاط نظراً لانخفاض معدل السريان ولوجود مركبة السرعة V_{ti} كما هو معطى بالمعادلة ٧.٨ . عندئذ تعطى قدرة الانضغاط كما يلي

* لمزيد من التفاصيل حول سعة تبريد الضاغط $\dot{Z}$ يمكن الرجوع إلى الجزء ٥.٦ في الفصل الخامس .

$$\dot{W}' = \dot{m}'\omega (V'_{to} r_o - V'_{ti} r_i) \tag{7.22}$$

وبالتعويض عن V'_{to} من معادلة ٧.١٠ و V'_{ti}من شكل ٧.١٣ ، حيث الشرطة العليا تعني ميل أرياش التوجيه بزاوية α_i ، فإن المعادلة السابقة تؤول إلى الآتي

$$\dot{W}' = \dot{m}'\omega (\omega r_o^2 - V'_{no} r_o \cot \beta_o - V'_{ni} \cot \alpha_i r_i) \tag{7.23}$$

وتستخدم أيضاً طريقة التحكم في سرعة الدوران للتحكم في سعة تبريد ضواغط الطرد المركزي . عندئذ تدار الدفاعة بتوربين متغير السرعة ، أو موتور حثي ، أو موتور ثابت السرعة يتصل بعمود دوران الضاغط بمجموعة تروس سرعات . ويتغير أداء الضاغط بدرجة كبيرة بتغير سرعة دورانه ، فتقل سعة التبريد – نتيجة نقص معدل السريان الذي يناوله الضاغط – وكذلك تنخفض قدرة تشغيل الضاغط بانخفاض سرعة دوران الدفاعة . ويتضح هذا جلياً عند دراسة أي منحنى ثابت الكفاءة بشكل ٧.١٢ ، والتعرف على أداء الضاغط بانخفاض رقم ماخ للدفاعة ، أي انخفاض سرعة دوران الدفاعة .

مثال ٧.٥

في مثال ٧.٢ ، إذا كان نصف القطر الخارجي لدخول عين الدفاعة هو ٥ سم وكان نصف قطرها الداخلي هو ٣ سم ، احسب

(أ) سرعة دخول بخار المبرد إلى عين الدفاعة

(ب) نسبة التغير في سعة تبريد الضاغط وكذلك نسبة التغير في قدرة الانضغاط عند تغير زاوية أرياش التوجيه إلى ٥٠° بدلاً من ٩٠° .

الحل

أ) من نتائج المثال ٧.٢ نجد أن حجم البخار النوعي عند الدخول = ٠.٠٦٥٣١ م³/كجم.

من معادلة ٧.٢٠ تعطي سرعة دخول البخار عند فتح أرياش التوجيه كلية كما يلي

$$V_{ni} = V_i = \frac{10 \times 0.06531}{\pi \ (0.05^2 - 0.03^2)} = 129.93 \quad m/s$$

ب) من معادلة ٧.٢١ ، تكون نسبة سعة التبريد عند تغير زاوية توجيه الأرياش إلى ٥٠° كما يلي

$$\frac{\dot{Z}'}{\dot{Z}} = \frac{\dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{1570.8 \times 0.05}{1570.8 \times 0.05 + 129.93 / tan \ 50} = 0.419$$

أي أن سعة التبريد قلت إلى حوالي ٤٢٪ من سعة التبريد عند فتح أرياش التوجيه كلية . ويكون معدل السريان عندئذ كما يلي

$$\dot{m}' = 0.419 \times 10 = 4.19 \quad kg/s$$

وتحسب V'_{ni} من معادلة ٧.١٩ كما يلي

$$V'_{ni} = 0.419 \times 129.93 = 54.44$$

وبفرض عدم تغير شروط الخروج من الضاغط ، فإن السرعة V'_{no} تحسب من المعادلة ٧.١١ كما يلي

$$V'_{no} = \frac{4.19 \times 0.0105}{2 \ \pi \times 0.15 \times 0.005} = 9.3 \quad m/s$$

من معادلة ٧.٢٣ تعطى قدرة الانضغاط كما يلي

$$\dot{W}' = 4.19 \times 1570.8 \ (1570.8 \times 0.15^2 - 9.3 \times 0.15 \times cot \ 60$$

$$- 54.44 \times 0.05 \times cot \ 50 \ )$$

$$= 212.3 \quad kW$$

وتكون نسبة هذه القدرة إلى القدرة عند فتح أرياش التوجيه كلية كما يلي

$$\frac{\dot{W}'}{\dot{W}} = \frac{212.3}{525} = 0.404$$

٨

صمامات التمدد

٨٠١ مقدمة

تستخدم صمامات التمدد – بالإضافة إلى خفض ضغط المبرد من الضغط العالي بالمكثف إلى الضغط الواطي بالمبخر – في التحكم بمعدل سريان المبرد إلى المبخر تبعاً لحمل التبريد . وهناك عدة أنواع من صمامات التمدد ، منها ما يعمل مع المبخرات جافة التمدد ، ومنها ما يعمل مع المبخرات المغمورة . ويوجد لكل نوع من هذه الأنواع بعض المميزات الخاصة به التي تؤهله للعمل في بعض التطبيقات دون التطبيقات الأخرى كما سنبين في الفصل الحالي . ويبين الفصل أيضاً أهم أنواع صمامات التمدد وأداءها عند ظروف تشغيل مختلفة ، والاحتياطات اللازمة عند استخدام هذه الصمامات .

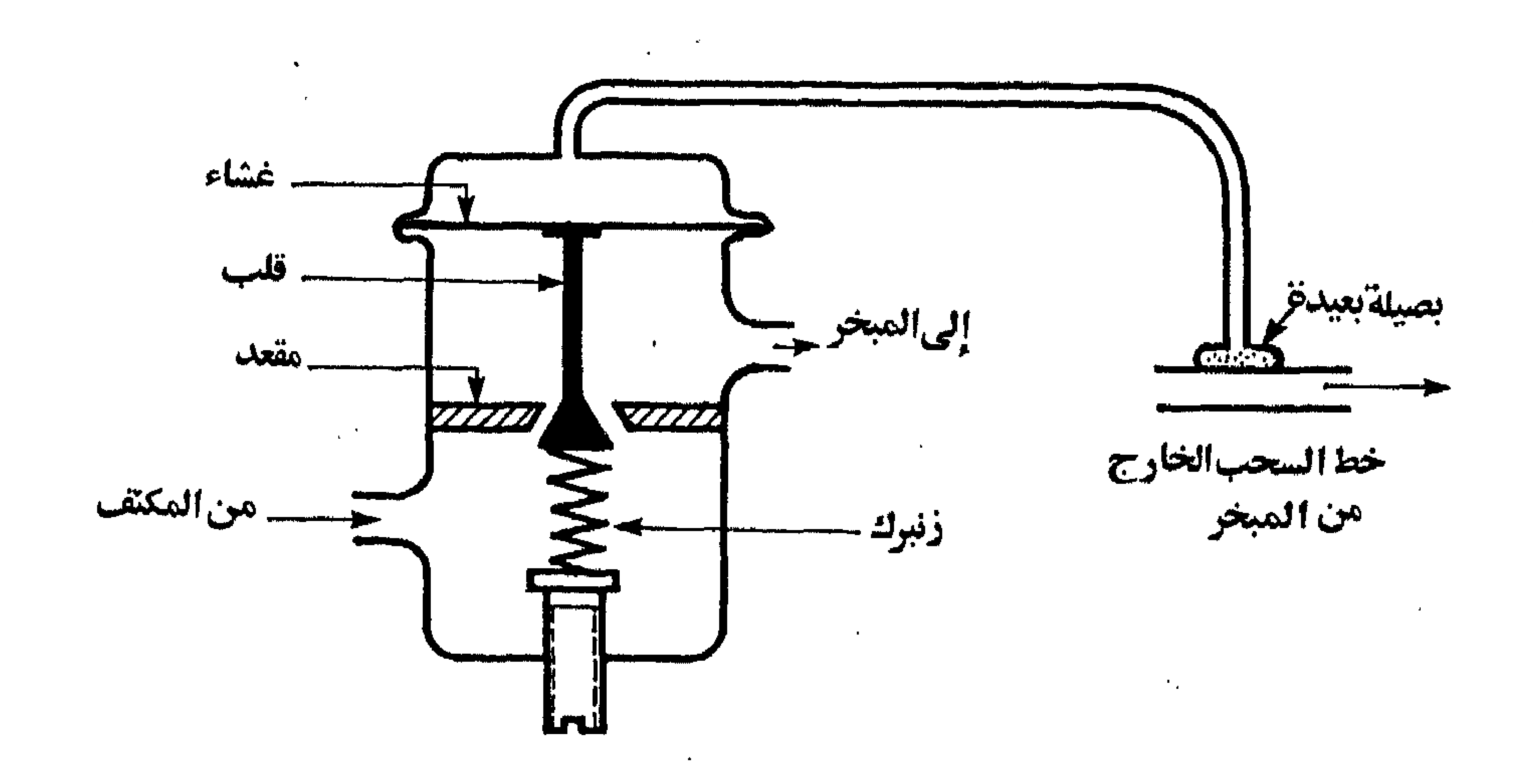
٨٠٢ صمام التمدد الثرموستاتي : الوصف والأداء

يعتبر صمام التمدد الثرموستاتي أكثر أنواع صمامات التمدد شيوعاً واستخداماً في العديد من تطبيقات التبريد . يستخدم هذا الصمام مع المبخرات جافة التمدد حيث

يعمل على تغيير معدل سريان المبرد إلى المبخر للتحكم في مقدار التحميص الفوقي لبخار المبرد الخارج من المبخر ، مما يحمي الضاغط من خطورة دخول طفح مرتد لسائل المبرد إليه .

يتكون الصمام كما هو مبين بشكل ٨.١ من قلب ، ومقعد ، وغشاء ، وبصيلة مملوءة بمائع ، وزنبرك . يتم اتزان الغشاء تحت تأثير الضغوط الآتية : ضغط المائع الموجود داخل البصيلة من أعلى ، وكل من ضغط الزنبرك وضغط المبخر من أسفل (انظر شكل ٨.٢). يفتح المحبس إذا زاد فرق ضغط البصيلة وضغط المبخر عن ضغط الزنبرك ، بينما يبدأ المحبس في الإغلاق إذا قل هذا الفرق عن ضغط الزنبرك . ويتغير الضغط داخل البصيلة تبعاً لدرجة حرارة البصيلة . وبتثبيت هذه البصيلة على خط البخار الخارج من المبخر ، فإن درجة حرارة البصيلة تساوي عندئذ درجة حرارة البخار الخارج من المبخر .

ولتوضيح كيف يعمل المحبس على المحافظة على قدر محدود من درجات التحميص الفوقي دعنا نفرض وجود شحنة سائلة – من نفس نوع مبرد نظام التبريد – داخل البصيلة.

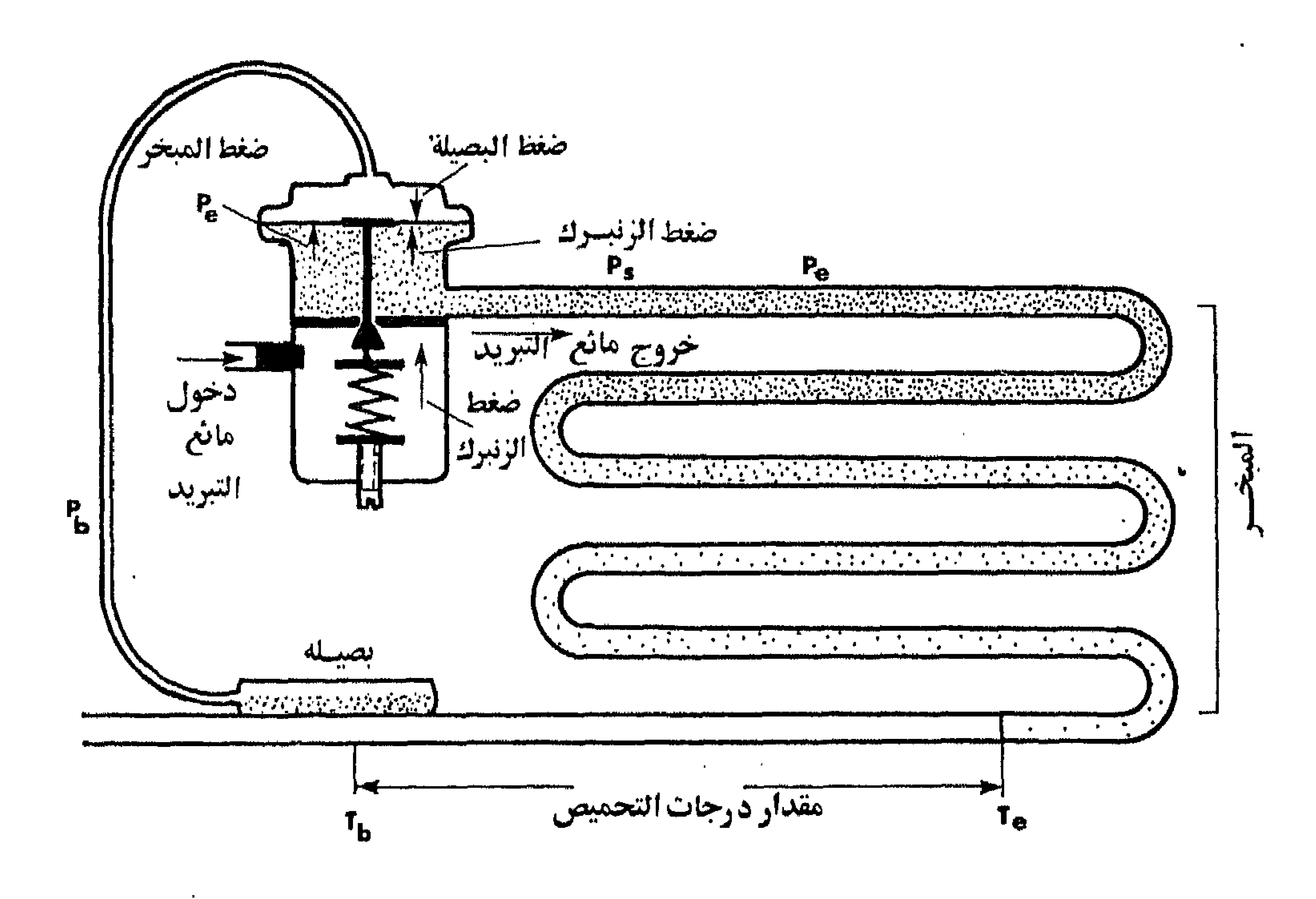


شكل ٨.١ صمام تمدد ثرموستاتي .

يبين شكل ٨.٢ توصيل صمام التمدد مع مبخر جاف التمدد . ويبين الشكل أيضاً اتزان غشاء الصمام تبعاً للمعادلة التالية

$$P_b = P_e + P_s \qquad (8.1)$$

حيث P_b هي ضغط بخار المبرد داخل البصيلة ، و P_e هي ضغط المبخر ، و P_s هي ضغط الزنبرك . يعمل المبخر عند درجة حرارة T_e تناظر الضغط P_e . بينما تكون درجة حرارة البصيلة هي T_b التي تناظر الضغط P_b . ونظراً لتساوي درجة حرارة البخار الخارج من المبخر مع درجة حرارة البصيلة ، فإن حالة البخار الخارج من المبخر يكون P_e و T_b ، بينما تكون حالة بخار البصيلة هي P_b و T_b . وتوقع هاتان الحالتان على خريطة الضغط – الأنثالبي كما هو مبين بشكل ٨.٣ حيث يتضح اعتماد فرق درجات التحميص الفوقي التي

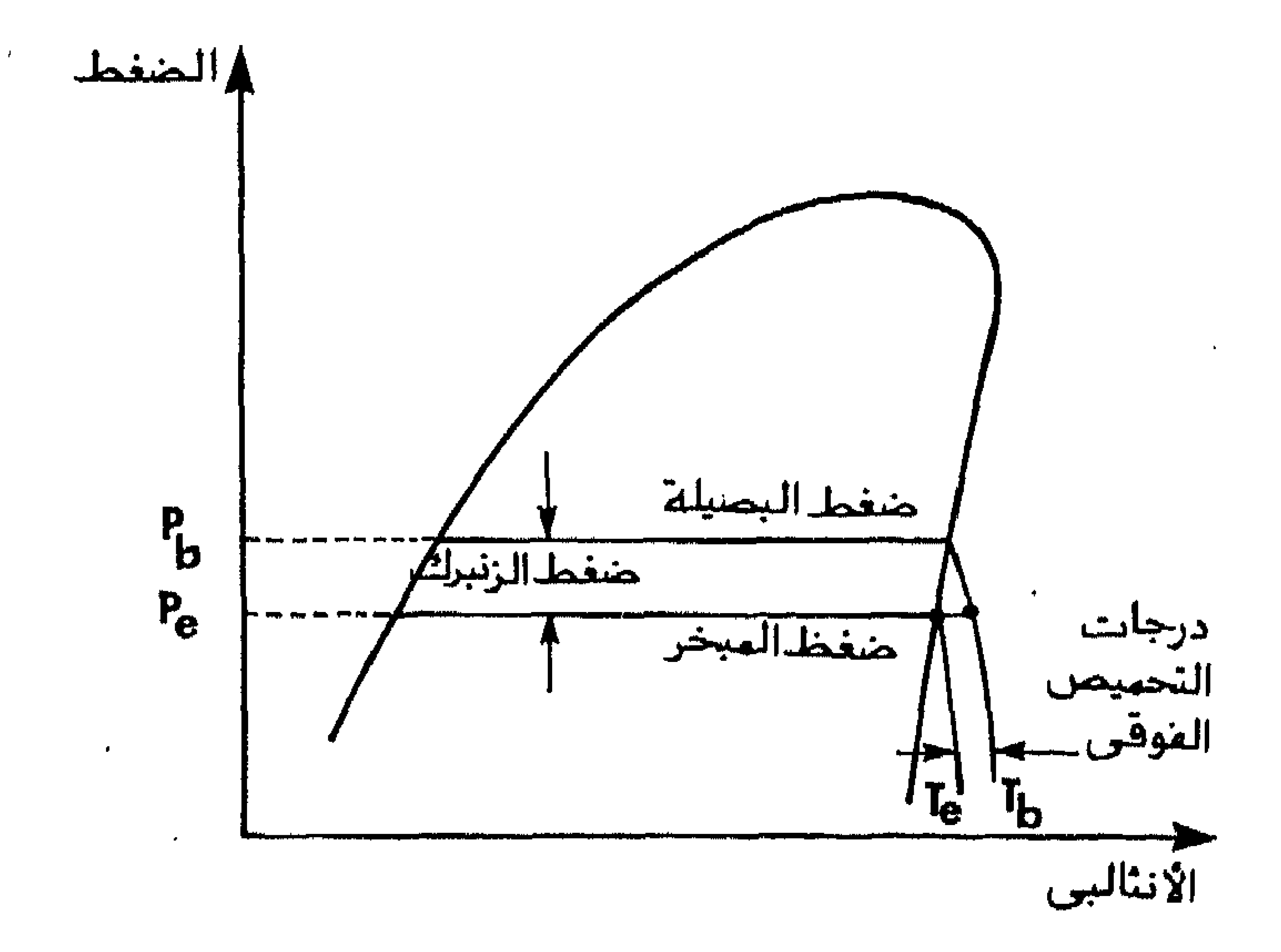


شكل ٨.٢ رسم تخطيطي لتوصيل صمام تمدد ثرموستاتي بمبخر جاف التمدد .

يعطيها الصمام على الفرق بين ضغط البصيلة وضغط المبخر ، أي على ضغط الزنبرك ، فيزيد فرق درجات التحميص الفوقي بزيادة ضغط الزنبرك ، ويقل هذا الفرق بنقص ضغط الزنبرك . ويقوم مصنعو صمامات التمدد الثرموستاتي بضبط ضغط الزنبرك بالمصنع قبل تسليم الصمامات للبيع .

يعتمد معدل سريان المبرد $\dot{m}$ خلال الصمام على فرق الضغط ΔP بين دخول وخروج الصمام ، ومساحة فتحة السريان A خلال الصمام ، بالإضافة إلى كثافة المبرد عند الدخول ومعامل السريان C_d خلال فتحة السريان . فمن معادلة برنولي لميكانيكا الموائع يقدر هذا السريان كما يلي

$$\dot{m} = C_d \; A \sqrt{2 \, \rho \, \Delta P} \qquad (8.2)$$



شكل ٨.٣ تمثيل حالة المبرد عند الخروج من المبخر ، وحالة شحنة البصيلة (من نفس نوع المبرد) لصمام تمدد ثرموستاتي على خريطة الضغط – الأنثالبي للمبرد .

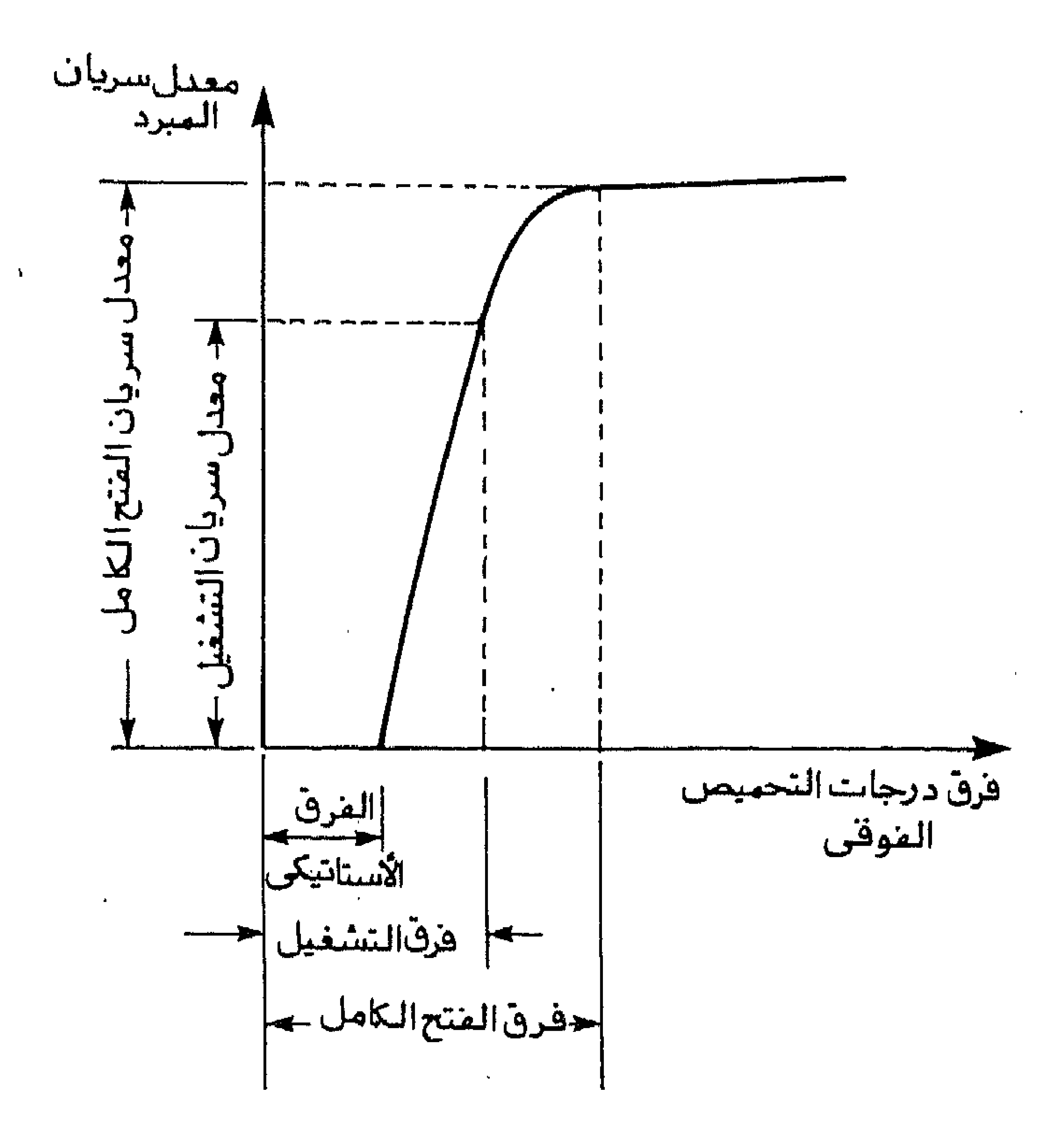
ويلاحظ عند حساب ΔP أنها لا تساوي مباشرة الفرق في الضغط بين ضغط الطرد وضغط السحب من المبخر، وإنما يجب أن يؤخذ في الحساب فقد الضغط في المكثف والمستقبل (إن وجد) ، وخط السائل بجميع ملحقاته ، والموزع (إن وجد) ، وكذلك فقد الضغط في خط السحب بجميع ملحقاته وفقد الضغط بالمبخر ، حتى تكون ΔP هي الفرق بين دخول وخروج الصمام . كما يلاحظ أيضاً تغير المساحة A بالصمام مع تغير وضع قلب الصمام تبعاً لاتزان القوى المؤثرة عليه ، أي تقل المساحة A كلما صغر فرق درجات التحميص الفوقي وتزيد كلما زاد فرق درجات التحميص الفوقي عند الخروج من المبخر . فإذا كانت A_m هي أقصى مساحة لسريان المبرد خلال مقعد الصمام ، وكانت ζ هي نسبة مساحة السريان بالصمام عند أي وضع إلى أقصى مساحة سريان ، فإن المعادلة ٨.٢ تؤول عندئذ إلى الآتي

$$\dot{m} = C_d \ \zeta A_m \sqrt{2 \rho \Delta P} \tag{8.3}$$

وتصمم صمامات التمدد الثرموستاتي لتعمل عادة بنسبة مساحة سريان حوالي ٧٥. . عند نقطة التصميم لنظام التبريد ، مما يسمح زيادة مساحة السريان ٢٥٪ أثناء التشغيل ، أي زيادة معدل سريان المبرد بحوالي ٢٥٪ .

يُعْرَف فرق درجات التحميص الفوقي الذي يغلق الصمام عنده كلية بالفرق الإستاتيكي لدرجات التحميص الفوقي ، بينما يعرف فرق درجات التحميص الذي يعمل عنده الصمام بفرق التشغيل لدرجات التحميص الفوقي . ويبين شكل ٨.٤ تغير نسبة فتحة الصمام مع فرق درجات التحميص الفوقي للصمام . أيضاً ، يبين الشكل أن الصمام يفتح كلية إذا ساوى أو زاد فرق درجات التحميص الفوقي عن فرق الفتح الكامل للصمام . وبالرجوع إلى دورة التبريد البسيطة المبينة بشكل ٨.٥ فإن معدل التبريد (سعة التبريد) الذي تعطيه الدورة يكون كما يلي

$$Q_e = \dot{m} \ (h_1 - h_3) \tag{8.4}$$



شكل ٨.٤ تغير معدل سريان المبرد خلال صمام تمدد ثرموستاتي مع فرق درجات التحميص الفوقي للصمام .

وباستخدام المعادلة ٨.٣ ، تؤول المعادلة السابقة إلى الآتي

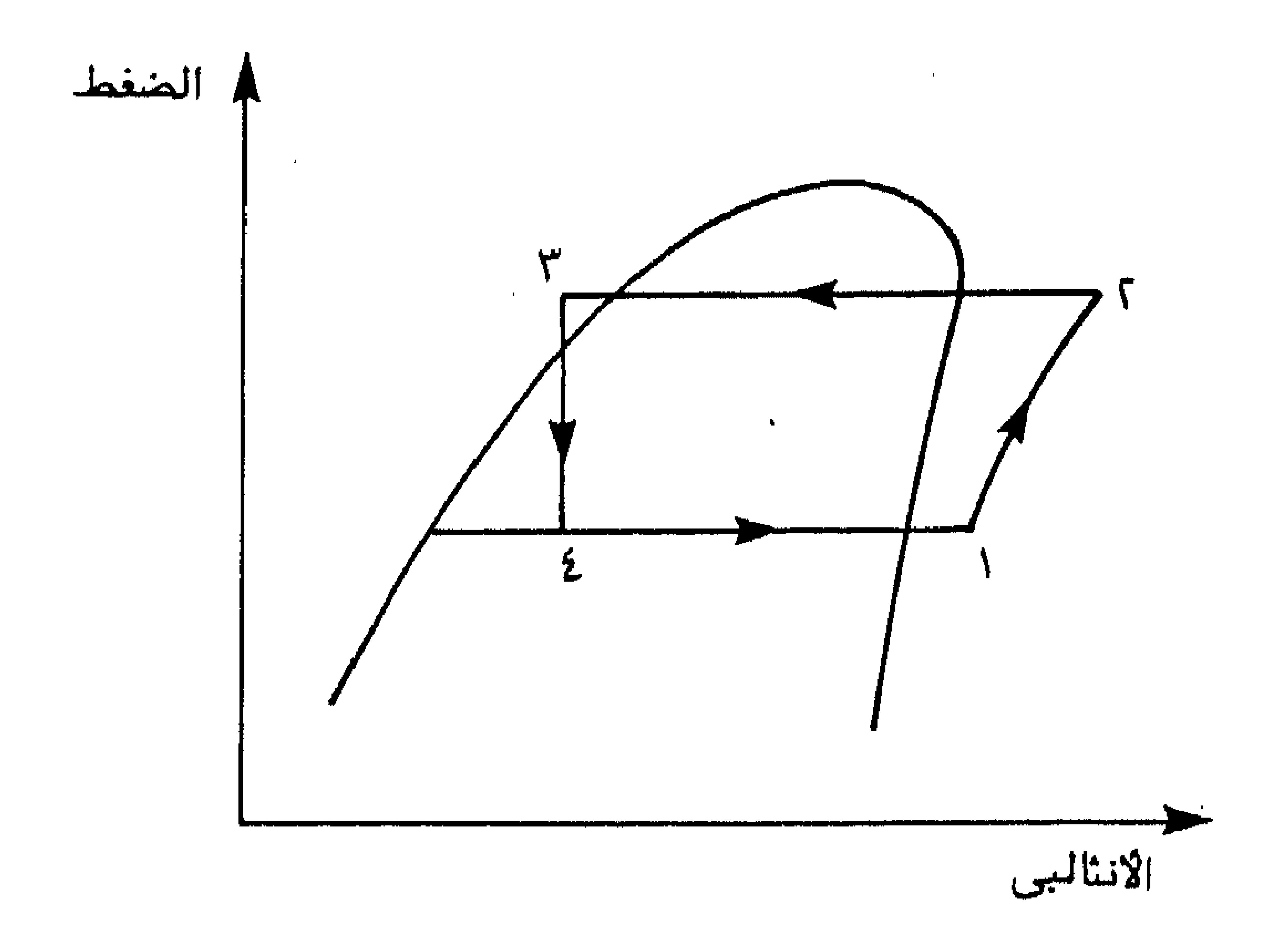
$$Q_e = C_d \ \zeta A_m \sqrt{2 \rho_3 \Delta P} \ . (h_1 - h_3) \tag{8.5}$$

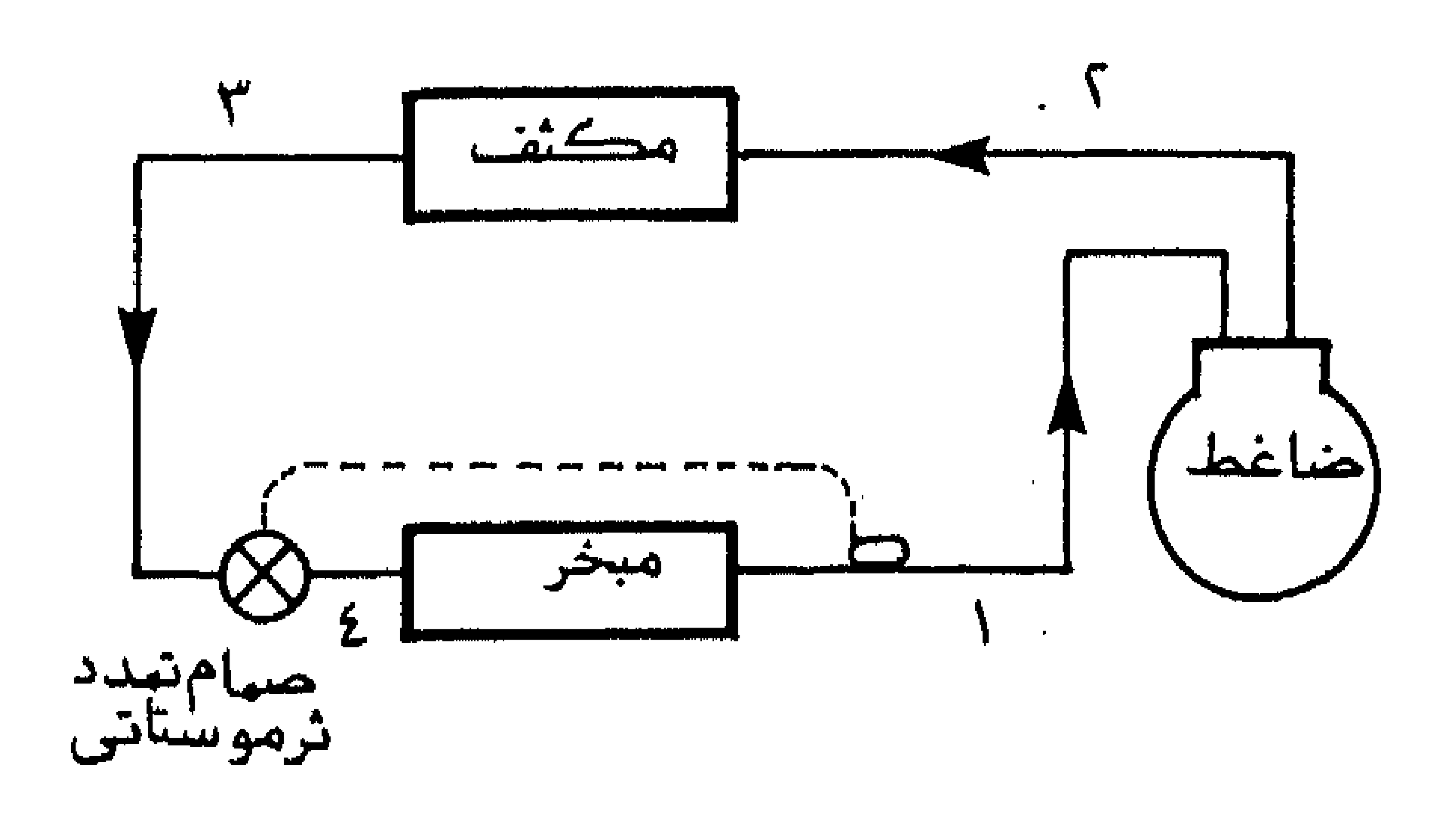
فإذا عمل صمام في دورتي تبريد إحداهما لها مبخر درجة حرارته $(T_e)_I$ ولها فرق ضغط ΔP_I خلال الصمام ، والأخرى لها مبخر درجة حرارته $(T_e)_{II}$ ولها فرق ضغط ΔP_{II} ، وكان الصمام يعمل عند نفس قيمة ζ في كل منهما ، فإن نسبة سعة تبريد المبخر I إلى سعة تبريد المبخر II تعطى كما يلي

$$\frac{(Q_e)_I}{(Q_e)_{II}} = \sqrt{\frac{(\rho_3 \Delta P)_I}{(\rho_3 \Delta P)_{II}}} \cdot \frac{(h_1 - h_3)_I}{(h_1 - h_3)_{II}} \tag{8.6}$$

وبفرض عدم تغير حالة الدخول ٣ إلى الصمام في نظامي التبريد ، وإهمال التغير في فرق الأنثالبي $(h_1 - h_3)$ في النظامين لصغر قيمته ، تؤول المعادلة السابقة إلى الآتي

$$\frac{(Q_e)_I}{(Q_e)_{II}} = \sqrt{\frac{\Delta P_I}{\Delta P_{II}}} \tag{8.7}$$





شكل ٨,٥ دورة تبريد بسيطة تستخدم صمام تمدد ثرموستاتي .

ويستخدم معظم مصنعو صمامات التمدد الثرموستاتي المعادلتين السابقتين كأساس لحساب سعة التبريد التي يعطيها صمام التمدد عند فروق ضغط مختلفة أو درجات حرارة مبخر مختلفة ، بدلالة سعة التبريد عند ظروف التشغيل الأسمية للصمام .

مثال ٨.١

تعطي جداول أحد مصنعي صمامات التمدد الثرموستاتي لمبرد ٢٢ صماماً يعمل بسعة تبريد قدرها ٣٠ كيلووات بين درجة حرارة مكثف قدرها ٤٤ °م ، ودرجة حرارة مبخر قدرها ٢ °م ، عند دخول السائل إلى الصمام في حالة التشبع . احسب سعة التبريد التي يعطيها الصمام إذا عمل عند درجة حرارة مبخر قدرها – ١٤ °م ، ونفس الشروط السابقة بالمكثف . افرض ٣ °م فرق درجات التحميص الفوقي بالصمام في الحالتين ، وافرض أن فرق الضغط للصمام هو فرق الضغط بين المكثف والمبخر .

الحل

نجد خواص مبرد ٢٢ من ملحق أ عند الخروج من المبخر والمكثف (انظر شكل ٨.٥) كما يلي

الحالة الأولى : مبخر ٢ °م :

$$P_1 = 531.2 \text{ k Pa} \quad , \quad h_1 = 406.5 \text{ kJ/kg}$$

$$P_3 = 1689.2 \text{ k Pa} \quad , \quad h_3 = 257.77 \text{ kJ/kg}$$

الحالة الثانية : مبخر عند – ١٤ °م :

$$P_1 = 307.2 \text{ k Pa} \quad , \quad h_1 = 400.5 \text{ kJ/kg}$$

$$P_3 = 1689.2 \text{ k Pa} \quad , \quad h_3 = 254.77 \text{ kJ/kg}$$

من معادلة ٨.٦ وبفرض نفس شروط الدخول في الحالتين نجد أن

$$\frac{(Q_e)_{II}}{(Q_e)_I} = \sqrt{\frac{(1689.2 - 307.2)}{(1689.2 - 531.2)}} \cdot \frac{(400.5 - 254.77)}{(406.5 - 254.77)}$$

$$= 1.093 \times 0.961 = 1.05$$

ومنها نجد أن سعة التبريد عندما تكون درجة حرارة المبخر – ١٤ ^{o}م هي

$$(Q_e)_{II} = 1.05 \times 30 = 31.5 \text{ kW}$$

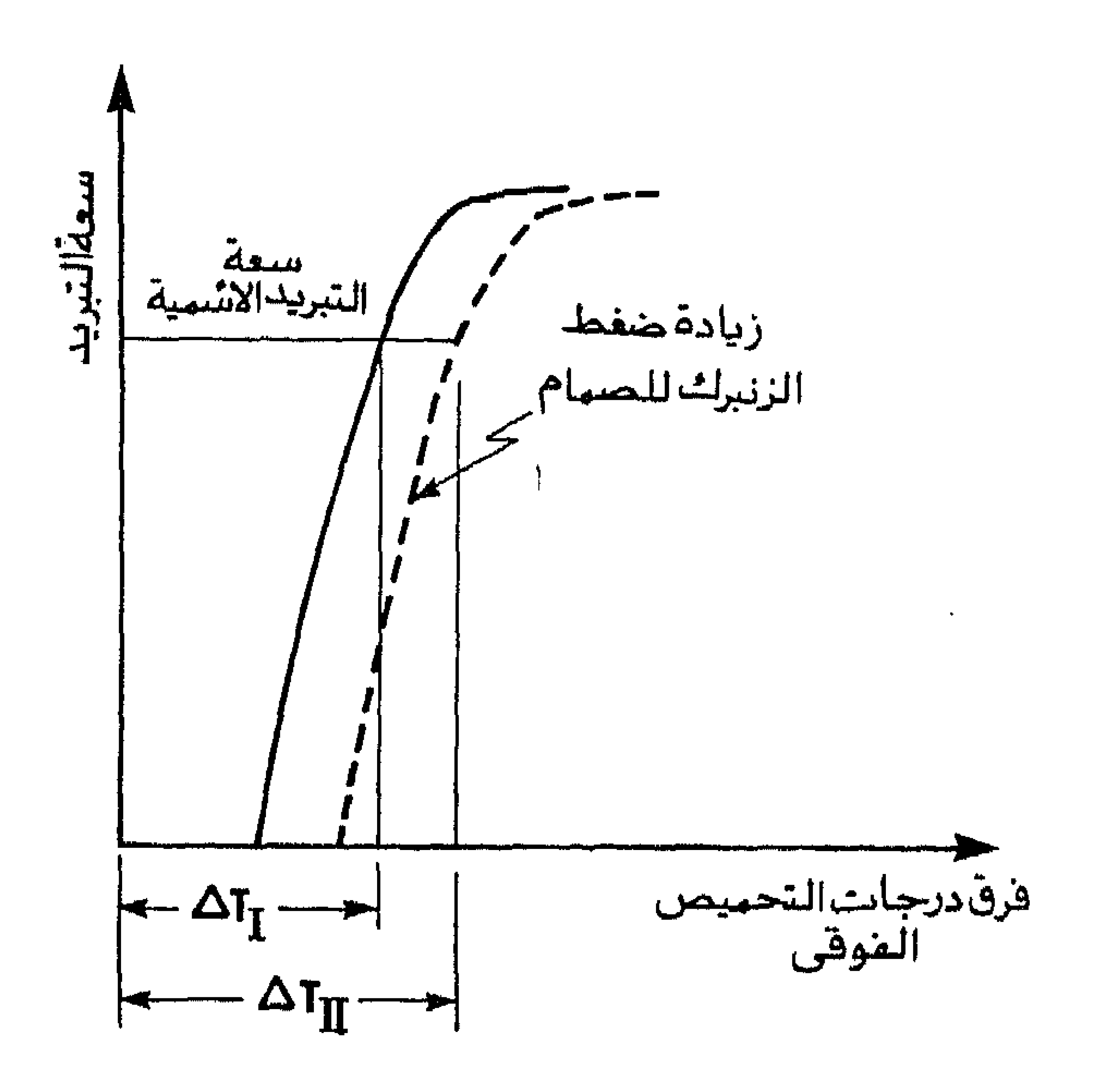
لاحظ الآن أن إهمال التغير في فرق الأنثالبي $(h_1 - h_3)$ يعطي الآتي

$$(Q_e)_{II} = 1.093 \times 30 = 32.8 \text{ kW}$$

٨.٣ أداء صمام التمدد الثرموستاتي عند ظروف تشغيل مختلفة

لدراسة أداء صمام التمدد الثرموستاتي عند ظروف تشغيل مختلفة دعنا أولاً نفرض شحنة سائلة من نفس مبرد النظام في بصيلة الصمام ، وستدرس الشحنات الأخرى بالبصيلة في الجزء القادم من الفصل .

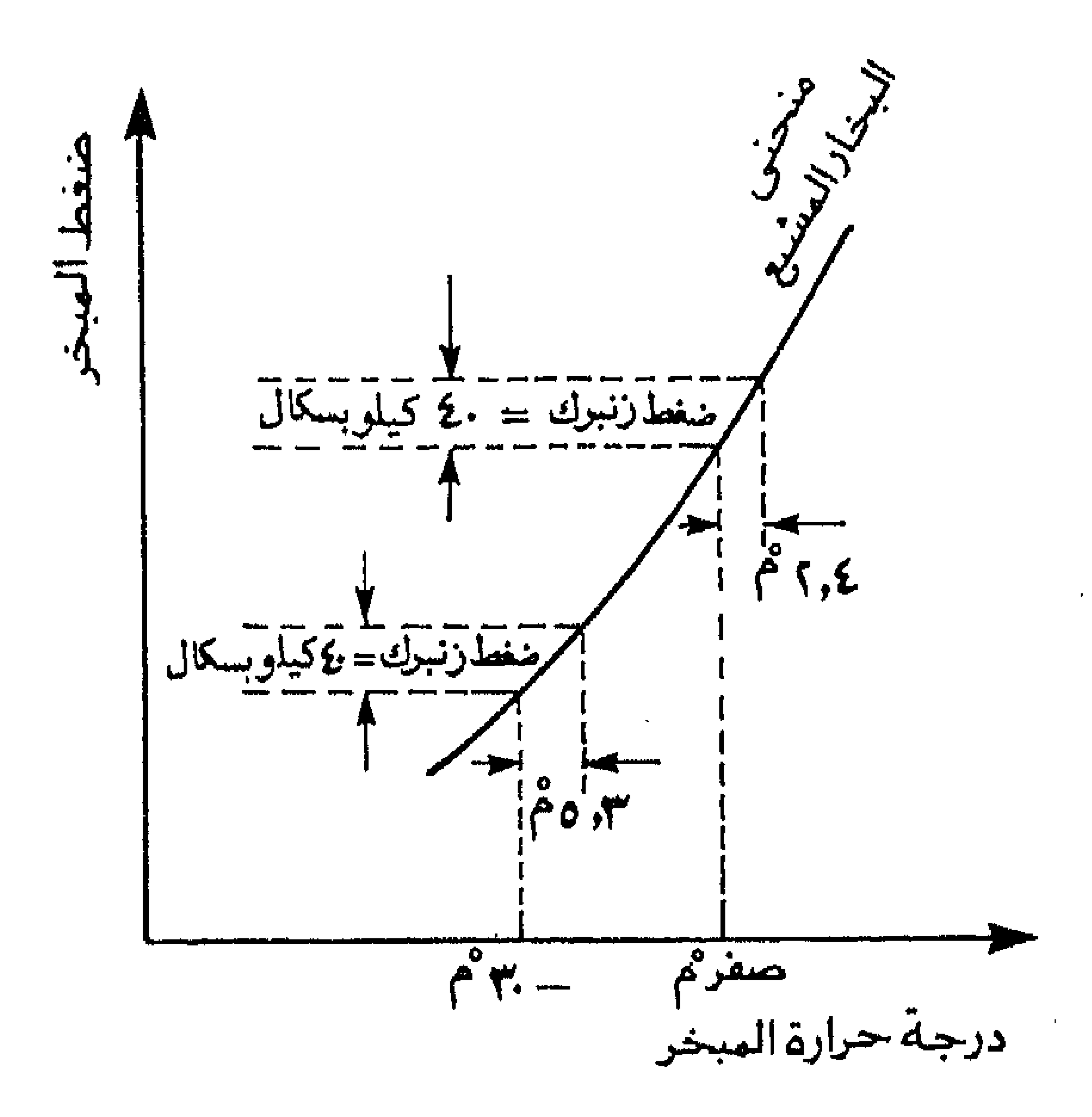
يعتمد فرق درجات التحميص الفوقي التي يعطيها الصمام على : ضغط الزنبرك وضغط دخول المبخر . ويُضبّط ضغط الزنبرك بالمصنع ، إلا أنه يمكن التحكم فيه بالموقع أيضاً . ويبين شكل ٨.٦ تغير سعة تبريد الصمام (وهي تتناسب مباشرة مع فتحة السريان بالصمام) مع درجات التحميص الفوقي عند ثبات ضغط المبخر . والشكل هو نفس شكل ٨.٤ الذي قدمناه سابقاً ، ولكن بعد تغيير ضغط الزنبرك . وتسبب زيادة ضغط الزنبرك من $(P_s)_I$ إلى $(P_s)_{II}$ زيادة الفرق الاستاتيكي لدرجات التحميص الفوقي للصمام . أيضاً ، يسبب زياد ضغط الزنبرك عند ثبات ضغط المبخر ، كما هو موضح بالشكل ، زيادة درجات



شكل ٨.٦ تغير سعة تبريد صمام تمدد ثرموستاتي مع فرق درجات التحميص الفوقي عند قيمتين مختلفتين لضغط الزنبرك ، وثبات ضغط المبخر .

التحميص الفوقي للصمام ، عند نفس سعة التبريد الاسمية ، من ΔT_{I} إلى ΔT_{II} .

يسبب تغير ضغط المبخر مع ثبات ضغط الزنبرك تغير درجات التحميص الفوقي التي تعطيها الشحنة السائلة ببصيلة الصمام . ولتوضيح هذا ندرس العلاقة بين الضغط – والأنثالبي لمبرد ٢٢ كما هو مبين بشكل ٨.٧ . نفرض الآن ضغط زنبرك قدره ٤٠ كيلوبسكال . من جداول خواص مبرد ٢٢ بملحق أ نجد أن هذا الضغط يعطي فرق درجات تحميص فوقية قدره ٢.٤ °م و ٥.٣ °م عند درجة حرارة مبخر قدرها صفر °م و – ٣٠ °م ، على التوالي . ويعني هذا زيادة درجات التحميص الفوقية التي يعطيها الصمام كلما انخفضت درجة حرارة المبخر . وبزيادة درجات التحميص بالمبخر يقل السطح الفعال للمبخر (وهي سطح المبخر الذي يتم عليه تبخير المبرد والحصول على التأثير

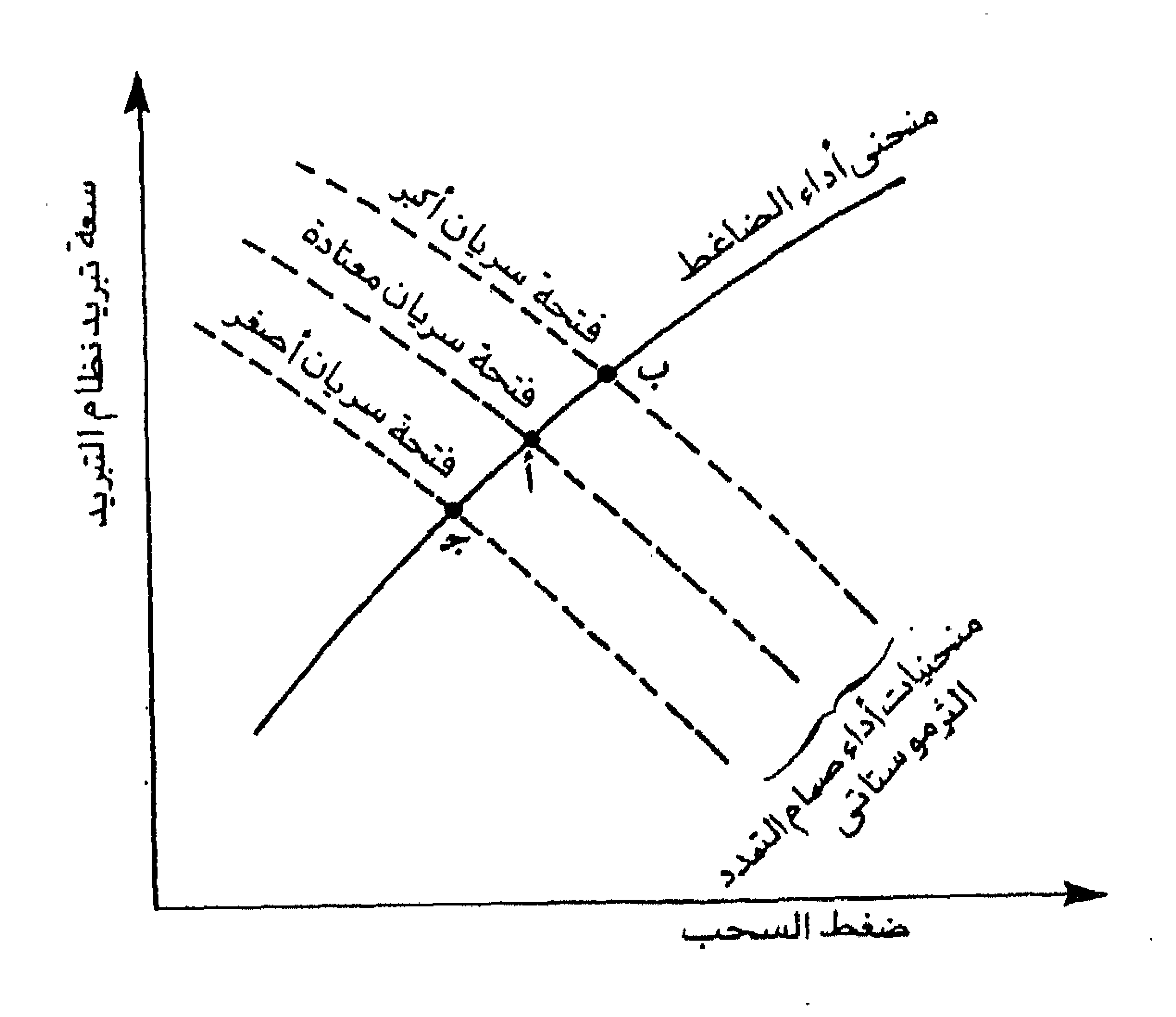


شكل ٨.٧ تغير درجات التحميص الفوقي لصمام تمدد به شحنة بصيلة سائلة مماثلة مع درجة حرارة المبخر عند ثبوت ضغط الزنبرك (بفرض مبرد ٢٢ كمثال) .

التبريدي) ، مما يؤدي إلى رفع درجة حرارة الحمل الحراري . وبزيادة درجة حرارة المبخر عن القيمة الأسمية التي أُختير عندها صمام التمدد ، يقل فرق درجات التحميص الفوقي مما قد يسبب طفح سائل المبرد إلى الضاغط ، وبالتالي تلف الضاغط ميكانيكياً .

يعتمد تغير سعة تبريد صمام التمدد الثرموستاتي مع ضغط السحب (ضغط المبخر) على المعادلة ٨.٥ . فكما هو واضح من المعادلة بثبات مساحة سريان المبرد خلال الصمام (أي ثبات قيمة ζ) تقل سعة التبريد بزيادة ضغط السحب ، ويوضح شكل ٨.٨ هذه العلاقة . ويبين الشكل أيضاً نقطة الاتزان لنظام التبريد ، وهي نقطة تقاطع منحنى أداء الصمام مع منحنى أداء الضاغط . ويُلاَحَظ من الشكل تغير نقطة الاتزان بتغير مساحة السريان بالصمام (أي تغير قيمة ζ) .

لدراسة أداء صمام التمدد عند أحمال تبريد مختلفة ، دعنا نبدأ من نقطة الاتزان أ بشكل ٨.٨ ، لنظام تبريد ما . ثم دعنا نفرض الآن زيادة الحمل الحراري عن معدله المعتاد مما يسبب زيادة درجات التحميص الفوقي لبخار المبرد الخارج من المبخر . ينتج عن هذا زيادة ضغط البصيلة عن مجموع ضغطي الزنبرك والمبخر ، فيتحرك قلب الصمام لتوسعة فتحة سريان المبرد ، فيزيد ضغط المبخر إلى الحد الذي يؤدي لاتزان غشاء الصمام في وضع جديد، وتصبح نقطة الاتزان الجديدة هي نقطة ب . عند النقطة ب يعطي نظام التبريد سعة تبريد أكبر من سعة التبريد عند الحالة أ ، ولكن عند درجة حرارة مبخر (ضغط سحب) أعلى من تلك المناظرة للحالة أ . بانخفاض الحمل الحراري يعمل الصمام في الاتجاه العكسي ، كما هو واضح من شكل ٨.٨ ، ويصل نظام التبريد إلى نقطة الاتزان جـ ، مثلاً .



شكل ٨.٨ تغير أداء صمام تمدد ثرموستاتي بنظام تبريد مع حمل التبريد بالنظام .

مثال ٨.٣

يعمل صمام تمدد ثرموستاتي في نظام تبريد بمبرد ٢٢ عند درجة حرارة مكثف قدرها ٤٤ °م ودرجة حرارة مبخر قدرها − ١٤ °م . إذا حوت البصيلة شحنة سائلة من مبرد ٢٢ ، احسب ضغط الزنبرك ليعطي ٢ °م من درجات التحميص الفوقي . إذا زاد ضغط الزنبرك إلى الضعف ، احسب فرق درجات التحميص الفوقي التي يعطيها الصمام . أهمل فقد الضغط بين المكثف ودخول الصمام ، وكذلك فقد الضغط بين الخروج من الصمام والخروج من المبخر .

الحل

من ملحق أ نجد خواص مبرد ٢٢ عند حالات التشغيل المختلفة . فيكون ضغط المبخر هو ٣٠٧.٢٤ كيلوبسكال (عند − ١٤ °م) ويكون ضغط البصيلة هو ٣٣٠.٣٤ كيلوبسكال (عند − ١٢ °م) . وعليه يكون ضغط الزنبرك هو

$$P_s = 330.34 - 307.24 = 23.1 \text{ kPa}$$

بزيادة ضغط الزنبرك إلى الضعف يصبح ٤٦.٢ كيلوبسكال وعليه يصبح ضغط البصيلة كما يلي

$$P_b = 307.24 + 46.2 = 353.44 \text{ kPa}$$

وهذا يناظر درجة حرارة قدرها − ١٠.١ °م أي بفرق درجات تحميص فوقي قدرها

$$\Delta T_{S.H.} = -10.1 - 14.0 = 3.9 \text{ °C}$$

٨.٤ اداء صمام التمدد الثرموستاتي عند إيقاف و تشغيل الضاغط

دعنا نفرض مرة أخرى أن بصيلة الصمام بها شحنة سائلة مماثلة لمبرد نظام

التبريد . عند إيقاف الضاغط يرتفع ضغط المبخر فجأة مما يسبب حركة غشاء الصمام في اتجاه إغلاق الصمام كلية . يعمل الصمام على عزل الضغط العالي بالمكثف عن الضغط المنخفض بالمبخر ، دون وجود أي وسيلة لمعادلة هذه الضغوط . ويسبب هذا الحاجة إلى عزم كبير لبدء تشغيل الضاغط مرة أخرى ، بالإضافة إلى تعرض الضاغط إلى إجهادات كبيرة نسبياً – عند بداية التشغيل – قد تؤدي إلى تلفه ميكانيكياً . وللتغلب على هذه المشكلة يجب إيجاد وسيلة لمعادلة الضغوط في خطي السحب والطرد بالضاغط عند الإيقاف . واحدة من هذه الوسائل هي عمل ثقب صغير في مقعد الصمام ، أو وصل أنبوب شعري صغير بين دخول وخروج الصمام ، مما يساعد على تعادل الضغوط عبر الصمام أثناء إغلاقه كلية . ومن الوسائل الأخرى لمعادلة الضغوط في النظم الكبيرة نسبياً عمل ممر تجنيبي يسمح بسريان المبرد إلى المبخر دون المرور خلال الصمام . ويتم تركيب صمام ملف لولبي على الممر التجنيبي ، ويفتح هذا الصمام فقط عند إيقاف الضاغط للسماح بمعادلة الضغوط على طرفي الضاغط ، ثم يقفل صمام الملف اللولبي تلقائياً فور تشغيل الضاغط .

عند بداية تشغيل الضاغط مرة أخرى ينخفض ضغط المبخر فجأة مع المحافظة على ضغط البصيلة عند قيمة مرتفعة ، مما يعمل على فتح صمام التمدد كلية . ونظراً للتخلف الزمني في خفض درجة حرارة البصيلة ، يستمر فتح الصمام لفترة زمنية مما قد يؤدي إلى التحميل الزائد لموتور الضاغط ، واحتمال طفح سائل المبرد إلى الضغط مسبباً تلفه ميكانيكياً . وللتغلب على هذه المشكلة يفضل استخدام صمام تمدد حدي ، أي له حد أقصى لضغط البصيلة . ويتم هذا إما ميكانيكياً وإما باستخدام شحنة خاصة بالبصيلة ، كما سنبين فيما بعد .

٨.٥ شحنة بصيلة صمام التمدد الثرموستاتي

هناك العديد من المواد التي تستخدم لشحن البصيلة . ولكل مادة من هذه المواد بعض المميزات وبعض العيوب مما يجعل هذه المواد مناسبة لشحن البصيلة في

بعض التطبيقات دون الأخرى . وفيما يلي نقدم خمساً من هذه المواد مع مميزات وعيوب كل منها.

٨.٥.١ الشحنة السائلة

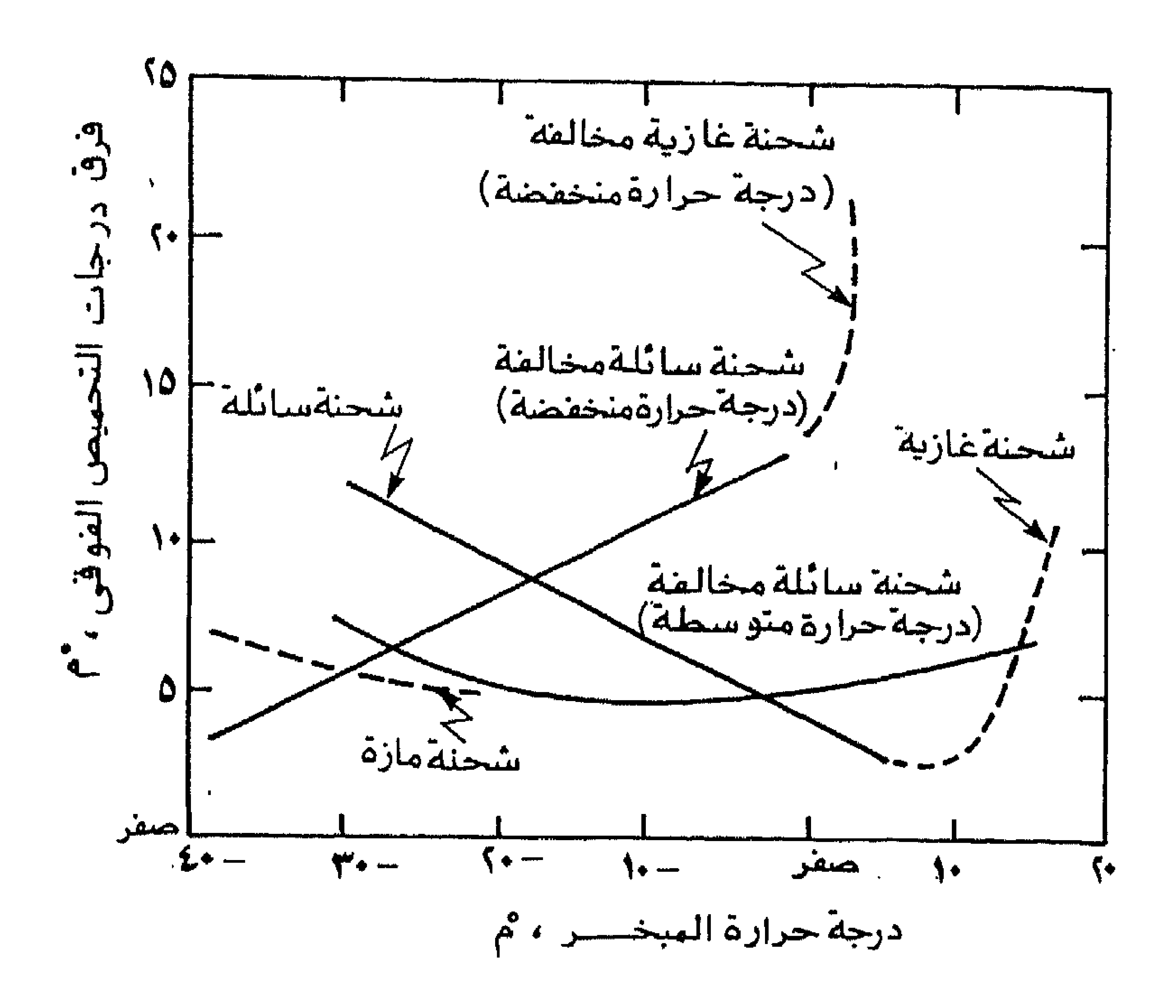
تعرف الشحنة السائلة للبصيلة بأنها شحنة من نفس نوع مبرد نظام التبريد الذي يعمل صمام التمدد به . ويشترط لهذه الشحنة أن تحوي البصيلة كمية من سائل المبرد تحت جميع الظروف دون السماح لها بالتبخير الكامل . ولقد قدمنا عيوب هذه الشحنة في الأجزاء السابقة من هذا الفصل . ويمكن تلخيص هذه العيوب مرة أخرى في الآتي

أ) انخفاض مقدار درجات التحميص الفوقي بارتفاع درجة حرارة المبخر مما قد يؤدي إلى احتمال طفح سائل المبرد إلى الضاغط عند درجات الحرارة المرتفعة بالمبخر وعند بداية تشغيل الضاغط ، (أنظر شكل ٨.٧ و ٨.٩) .

ب) ارتفاع مقدار درجات التحميص الفوقي بانخفاض درجة حرارة المبخر ، مما يعني انخفاض مقدار المساحة الفعالة من سطح المبخر (انظر أيضاً شكل ٨.٧ و ٨.٩) .

أما مميزات الشحنة السائلة فهي قدرة هذه الشحنة على التحكم في سريان المبرد في حالة وضع صمام التمدد وغشاء التحكم بالصمام في درجة حرارة أبرد نسبياً من درجة حرارة البصيلة ، وهي الحالة التي لا تعمل عندها الشحنة الغازية أو الشحنة الغازية المخالفة كما سنبين فيما بعد .

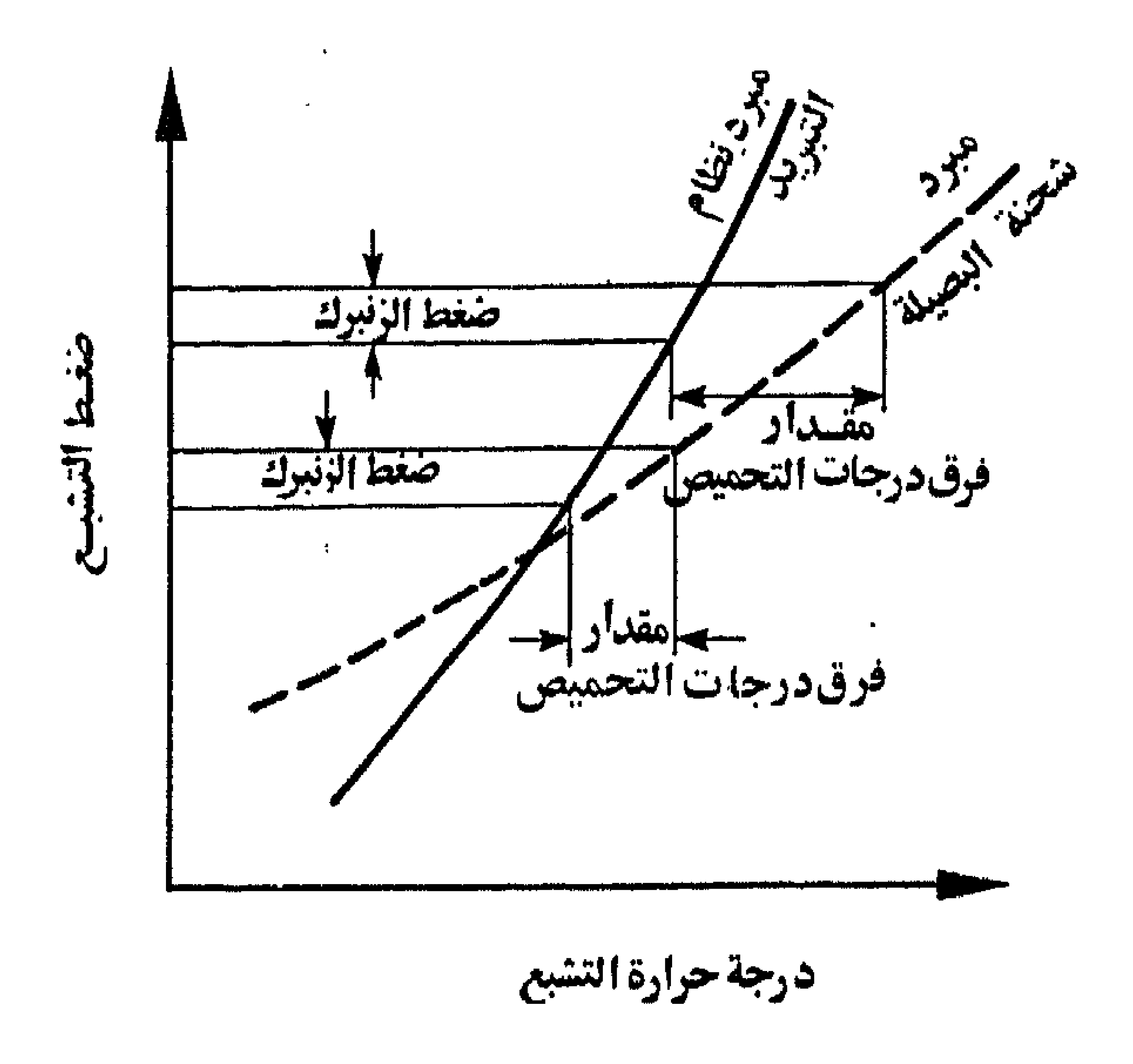
ونظراً للعيوب التي قدمناها سابقاً للشحنة السائلة فهي غير شائعة الاستخدام ، وتستخدم فقط في نظم التبريد الكبيرة المستخدمة للأمونيا ، وتستخدم أيضاً في بعض التطبيقات الأخرى غير التقليدية [سبورلان ١٩٨١] .



شكل ٨.٩ مقارنة تغير فرق درجات التحميص الفوقي مع درجة حرارة المبخر لشحنات مختلفة ببصيلة صمام تمدد ثرموستاتي [الاشراي ١٩٨٨].

٨.٥.٣ الشحنة السائلة المخالفة

في هذه الحالة تشحن البصيلة بمبرد مخالف لمبرد نظام التبريد . ويلزم في هذه الشحنة أيضاً وجود جزء منها في الحالة السائلة تحت جميع الظروف . ويختار نوع مبرد الشحنة السائلة المخالفة بحيث تكون العلاقة بين ضغط التشبع ودرجة حرارة التشبع لهذا المبرد أكثر إستواء من العلاقة المماثلة لمبرد نظام التبريد المصاحب لصمام التمدد ، انظر شكل ٨.١٠ . وينتج عن اختيار شحنة البصيلة هذه أن يزداد مقدار درجات التحميص الفوقي للصمام بارتفاع درجة حرارة المبخر . ويمكن تلخيص مميزات الشحنة السائلة المخالفة في الآتي



شكل ٨.١٠ تغير فرق درجات التحميص الفوقي لصمام تمدد ثرموستاتي مع ضغط المبخر باستخدام بصيلة ذات شحنة سائلة مخالفة .

أ) زيادة مقدار درجات التحميص الفوقي لصمام التمدد بارتفاع ضغط المبخر مما يعطي حماية للضاغط من طفح سائل المبرد عند أحمال التبريد المرتفعة نسبياً ، وعند بداية التشغيل .

ب) خفض مقدار درجات التحميص الفوقي لصمام التمدد بانخفاض ضغط المبخر مما يعني كبر السطح الفعال للمبخر ، أي تحسين عملية التبريد .

جـ) خفض الفترة الزمنية اللازمة لبدء التشغيل والوصول إلى حالة الاستقرارحيث يفتح الصمام بقدر بسيط عند بداية التشغيل (نتيجة ارتفاع مقدار درجات التحميص الفوقي بارتفاع ضغط المبخر) مما يسمح بسريان المبرد بمعدل منخفض ، فيسهل للضاغط عند بدء التشغيل الوصول إلى حالة الاستقرار .

د) حماية موتور الضاغط من الحمل الزائد عند بداية التشغيل لنفس السبب السابق .

وبالإضافة إلى المميزات السابقة ، فهناك بعض العيوب للشحنة السائلة المخالفة ، منها الآتي

أ) بزيادة حمل التبريد يرتفع ضغط المبخر ، وبالتالي تزيد درجات التحميص الفوقي التي يسببها صمام التمدد ، ويعني هذا انخفاض المساحة الفعالة للمبخر في الوقت الذي يحتاج إليه الحمل الحراري إلى كبر هذه المساحة وليس تصغيرها .

ب) لا تضمن الشحنة السائلة المخالفة حداً أعلى لضغط المبخر ، كما هو الحال في الشحنات الغازية التي ستعرض في الأجزاء التالية . لذا لا تصلح هذه الشحنة في التطبيقات التي تحتاج إلى حفظ ضغط المبخر أثناء التشغيل أقل من حد أعلى له ، مثل تطبيقات تكييف الهواء التي تحتاج إلى نزع رطوبة الهواء إلى قيمة معينة من نسبة الرطوبة .

جـ) انخفاض درجات التحميص الفوقي بانخفاض ضغط المبخر مما قد يسبب طفح سائل المبرد من المبخر إلى الضاغط .

وتستخدم الشحنة السائلة المخالفة في العديد من التطبيقات التي تحتاج إلى درجة حرارة تجارية (أعلى من − ١٥°م) أو تحتاج إلى درجة حرارة منخفضة (أقل من − ١٥° م) . وللتغلب على العيب جـ السابق يلزم ضبط أفضل قيمة لدرجات التحميص الفوقي للصمام عند أقل درجة حرارة متوقعة بالمبخر . ويلاحظ تغير نوع الشحنة السائلة المخالفة المستخدمة في نظام التبريد بتغير نوع المبرد المستخدم بالنظام ، ومدى درجة حرارة مبخر النظام .

٨.٥.٣ الشحنة الغازية

تشحن البصيلة في هذه الحالة بقدر محدود من سائل مبرد نظام التبريد بحيث

تتبخر الشحنة كلية إذا زادت درجة حرارة البصيلة عند درجة حرارة معينة . ويضمن هذا الشرط الا يزيد ضغط البصيلة بأية قيمة محسوسة بارتفاع درجة حرارتها ، ويعرف هذا بخاصية الحد الأعلى للضغط ، فبارتفاع ضغط المبخر تتبخر كل شحنة البصيلة ويصل ضغط البصيلة إلى أقصى قيمة له ، وبالتالي لا يسبب ارتفاع ضغط المبخر أي ارتفاع إضافي لضغط البصيلة ، مما يعني أن يبدأ الصمام في الإغلاق . وعليه فإن أهم مميزات الشحنة الغازية الآتي

أ) عدم زيادة ضغط البصيلة عن حد معين مما يساعد على حماية موتور الضاغط من الحمل الزائد عند زيادة حمل التبريد .

ب) حماية الضاغط من طفح سائل المبرد عند بداية التشغيل نظراً لعدم سماح الصمام بسريان المبرد عند بداية التشغيل ، ثم تدريجياً يعمل الصمام على زيادة معدل سريان المبرد بانخفاض ضغط المبخر .

جـ) خفض فترة الأخفاض للنظام (الفترة الزمنية اللازمة لاستقرار النظام بعد بدء التشغيل) لنفس السبب ب السابق .

أما أهم عيوب الشحنة الغازية فالآتي

أ) كبر فرق درجات التحميص الفوقي بانخفاض درجة حرارة المبخر مما يسبب خفض المساحة الفعالة للمبخر .

ب) فقد التحكم إذا كانت درجة حرارة غشاء التحكم عند درجة حرارة أقل نسبياً من درجة حرارة البصيلة ، أو إذا لمست أنبوبة البصيلة أي سطح أبرد من البصيلة ، حيث يتكثف بخار الشحنة مسبباً فقد التحكم (فقط عند تبخر شحنة البصيلة كلية).

وتستخدم الشحنة الغازية في تطبيقات تكييف الهواء القديمة ، ولا تستخدم النظم الحديثة هذه الشحنة نتيجة العيب السابقة ، إلا في بعض التطبيقات النادرة .

٨.٥.٤ الشحنة الغازية المخالفة والشحنة المازة

تشحن البصيلة في حالة الشحنة الغازية المخالفة بقدر محدود من سائل مبرد مخالف لمبرد نظام التبريد . وتتبخر هذه الشحنة كلية متى زادت درجة حرارة البصيلة عن درجة معينة . وعليه تمتاز الشحنة الغازية المخالفة بمميزات كل من الشحنة السائلة المخالفة والشحنة الغازية .

المادة المازة هي مادة لها قدرة على امتصاص الغازات والأبخرة بمعدلات مختلفة تبعاً لدرجة حرارة هذه المادة . ومن أمثلة هذه المواد جل السليكا الشرهة لامتصاص بخار الماء ، وغاز ثاني أكسيد الكربون . تشحن البصيلة بمادة مازة مثل جل السليكا بينما يشحن الأنبوب الشعري الواصل بين المادة المازة والصمام بالغاز الذي سيمتص من قبل المادة المازة، مثل ثاني أكسيد الكربون . ويتغير مقدار غاز ثاني أكسيد الكربون بالأنبوب الشعري تبعاً لمقدار امتصاصه بجل السليكا في البصيلة ، وبالتالي تبعاً لدرجة حرارة البصيلة . وينتج عن هذا تغير ضغط ثاني أكسيد الكربون على غشاء الصمام مع تغير درجة حرارة البصيلة ، وبالتالي يتحكم الصمام في مقدار درجات التحميص الفوقي لبخار المبرد الخارج من المبخر . ومن أهم مميزات الشحنة المازة الآتي

أ) اعتماد التحكم على درجة حرارة البصيلة فقط ، دون الاعتماد على درجة حرارة الجو المحيط بالأنبوب الشعري ، أو غشاء الصمام (أحد عيوب الشحنة الغازية) .

ب) إمكانية الحصول على صفات معينة لمقدار درجات التحميص الفوقي عند مدى التشغيل لضغط المبخر وذلك باستخدام مواد مازة مختلفة مع غازات وأبخرة مختلفة.

أما أهم عيوب شحنة المادة المازة فهي الآتي

أ) بطء استجابة التحكم بالصمام عند تغير مقدار درجات التحميص الفوقي لبخار المبرد الخارج من المبخر .

ب) عدم إمكانية عمل الصمام بخاصية الحد الأعلى للضغط ، كما هو الحال في حالة الشحنة الغازية أو الشحنة الغازية المخالفة [الأشراي ١٩٨٨] .

ويبين شكل ٨.٩ تغير فرق درجات التحميص الفوقي مع درجة حرارة المبخر لشحنات مختلفة ببصيلة صمام تمدد ثرموستاتي . ويتضح من الشكل مدى اعتماد فرق درجات التحميص الفوقي لصمام التمدد على درجة حرارة المبخر ، لكل شحنة من الشحنات التي عرضناها سابقاً . .

مثال ٨.٣

يعمل نظام تبريد بمبرد ١٢ بمكثف درجة حرارته ٤٠ °م ومبخر درجة حرارته – ١٠ °م وله ٣ °م فرق درجات تحميص فوقي عند الخروج منه . قرر أحد المهندسين استخدام صمام تمدد ثرموستاتي ببصيلة لها شحنة سائلة من مبرد ٢٢ .

أ) تنبأ بمقدار درجات التحميص الفوقي التي يعطيها الصمام إذا انخفضت درجة حرارة المبخر إلى – ٢٥ °م أثناء تشغيل النظام .

ب) تنبأ بمقدار درجات التحميص الفوقي التي يعطيها الصمام إذا ارتفعت درجة حرارة المبخر إلى ٦ °م أثناء تشغيل النظام .

جـ) علق على نتائج أ و ب ، وبين إذا كانت شحنة البصيلة مناسبة أم غير مناسبة لنظام التبريد الحالي .

الحل

من جداول مبرد ١٢ ومبرد ٢٢ في ملحق أ ، نجد الآتي عند التشغيل المعتاد لنظام التبريد :

ضغط المبخر (مبرد ١٢) = ٢١٩.٣ كيلوبسكال

درجة حرارة البصيلة = – ١٠ + ٣ = – ٧ °م

ضغط البصيلة (مبرد ٢٢ عند - ٧ ° م) = ٣٩٤.١ كيلوبسكال

ضغط الزنبرك = ٣٩٤.١ -٢١٩.٣ = ١٧٤.٨ كيلوبسكال

أ) درجة حرارة المبخر = - ٢٥ ° م

ضغط المبخر (مبرد ١٢) = ١٢٣.٧٣ كيلوبسكال

ضغط البصيلة (مبرد ٢٢) = ١٢٣.٧٣ + ١٧٤.٨ = ٢٩٨.٧ كيلويسكال

درجة حرارة البصيلة (مبرد ٢٢ عند ضغط ٢٩٨.٧ كيلوبسكال) = - ١٤.٨ ° م

فرق درجات التحميص الفوقي = - ١٤.٨ - (- ٢٥) = ١٠.٢ ° م

ب) درجة حرارة مبخر = ٦ ° م

ضغط المبخر (مبرد ١٢) = ٣٧٤.٤ كيلوبسكال

ضغط البصيلة (مبرد ٢٢) = ٣٧٤.٤ + ١٧٤.٨ = ٥٤٩.٢ كيلوبسكال

درجة حرارة البصيلة (مبرد ٢٢ عند ضغط ٥٤٩.٢ كيلوبسكال) = ٣ ° م

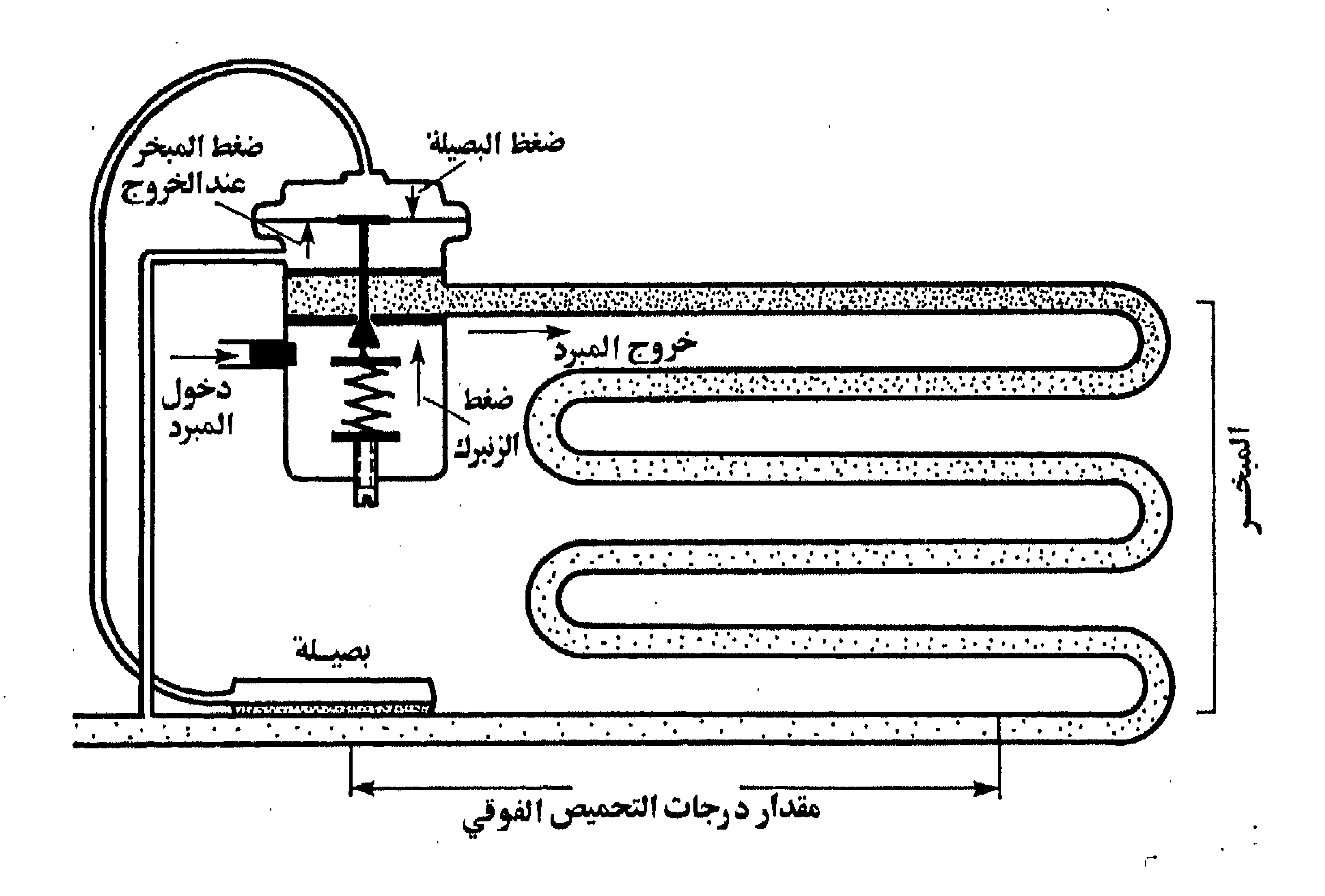
فرق درجات التحميص الفوقي = ٣ - ٦ = - ٣ ° م

جـ) يلاحظ عند انخفاض درجة حرارة المبخر إلى - ٢٥ ° م أن الصمام يعطي فرق درجات تحميص فوقي قدرها ١٠.٢ ° م وهو قدر كبير يؤدي إلى صغر السطح الفعال للمبخر وبالتالي تقليل سعة التبريد بالنظام ، أما عند ارتفاع درجة حرارة المبخر إلى ٦ ° م فلا يستطيع الصمام إعطاء أي قدر من درجات التحميص الفوقي (-٣ ° م ليست بالطبع فرق درجات تحميص فوقي) مما يسبب طفح سائل المبرد إلى الضاغط وتلفه ، وبناء على ما تقدم فقد اخفق هذا المهندس في اختيار شحنة البصيلة السائلة المخالفة للاستخدام مع نظام التبريد الحالي .

٨.٦ صمام التمدد الثرموستاتي المعادل خارجياً

يعمل صمام التمدد الثرموستاتي الذي قدمناه سابقاً على أساس اتزان ضغط

البصيلة مع ضغطي الزنبرك ودخول المبخر ، ويعمل هذا الصمام في العادة بكفاءة طيبة مالم يكن هناك فرق محسوس في الضغط بين الدخول والخروج من المبخر . ولتوضيح ذلك دعنا نفرض أن صماماً يعمل عند ضغط مبخر حوالي ١.٥ بار (أي حوالي – ٢٠ °م) باستخدام مبرد ١٢ وضغط زنبرك ٠.٢ بار ، وبالتالي يصبح ضغط الاتزان للبصيلة هو ١.٧٠ بار وهو ما يعادل درجة حرارة قدرها – ١٧ درجة مئوية ، أي بمقدار ٣ درجات تحميص . وبفرض أن هناك انخفاضاً (فقد) في ضغط المبخر بين الدخول والخروج قدره ٠.٤ بار مثلاً ، فإن ضغط المبخر عند الخروج يصبح ١.١ بار ، وتكون درجة حرارة التشبع المناظرة لذلك الضغط حوالي – ٢٨ درجة مئوية . وبالتالي يصبح مقدار درجات التحميص الفعلية للصمام هي ١١ درجة مئوية ، وهي بالتأكيد أكبر بكثير من قيمة التصميم الأولى وهي ٣ درجات مئوية ، مما يقلل المساحة الفعالة للمبخر ، وبالتالي تنخفض قدرة التبريد بالنظام المستخدم . وللتغلب على هذه المشكلة يلزم أن يكون اتزان غشاء الصمام بين ضغط



شكل ١١ . ٨ رسم تخطيطي لتوصيل صمام تمدد ثرموستاتي معادل خارجياً بمبخر جاف التمدد .

البصيلة من جهة ، و ضغطي الزنبرك والمبخر عند الخروج (بدلاً من الدخول) من جهة أخرى . ويعرف هذا النوع من الصمامات بصمامات التمدد الثرموستاتي المعادلة خارجياً . ويوضح شكل ٨.١١ رسماً تخطيطاً لهذا الصمام .

ويُوصَى باستخدام هذا النوع من الصمامات إذا كان هناك انخفاض كبير في الضغط خلال المبخر ، ويوضح جدول ٨.١ الحدود التي يفضل بعدها استخدام صمام التمدد الثرموستاتي المعادل خارجياً . وعموماً ليس هناك أي ضرر من استخدام هذا النوع من الصمامات إذا قل فقد الضغط بالمبخر عن الحدود الموضحة بالجدول . ويلزم استخدام هذا النوع من الصمامات إذا حوى النظام موزع مبرد أو صمام تمدد ثرموستاتي متعدد فتحات الانسياب ، وبغض النظر عن قيمة الفقد في ضغط المبخر .

جدول ٨.١ الحد الأعلى لفقد ضغط المبخر الذي ينصح بعده باستخدام صمام تمدد ثرموستاتي معادل خارجياً .

	درجة حرارة المبخر (درجة مئوية)				
المبرد	٥	– ٥	– ١٥	– ٣٠	– ٤٠
	فقد الضغط (بار*)				
رقم ١٢	٠٫١٥٠	٠٫١٠٠	٠٫٠٧٥	٠٫٠٥٠	٠٫٠٣٠
رقم ٢٢	٠٫٢٠٠	٠٫١٥٠	٠٫١٠٠	٠٫٠٧٥	٠٫٠٥٠
رقم ٥٠٠	٠٫١٥٠	٠٫١٠٠	٠٫٠٧٥	٠٫٠٥٠	٠٫٠٣٠
رقم ٥٠٢	٠٫٢٠٠	٠٫١٧٥	٠٫١٢٥	٠٫٠٦٥	٠٫٠٧٥
رقم ٧١٧ (أمونيا)	٠٫٢٠٠	٠٫١٥٠	٠٫١٠٠	٠٫٠٧٥	٠٫٠٥٠

* ١ بار = ١٠٠ كيلوبسكال

ويراعى عند تركيب الوصلة الخارجية لمعادلة الصمام أن يتم التوصيل عند نقطة تبعد حوالي ١٥ سم من البصيلة من جهة الضاغط . كما يجب إذا كان خط السحب أفقياً عند نقطة التوصيل ، أن يوضع أنبوب التعادل من أعلى نقطة في خط السحب لتجنب تصفية سائل المبرد إلى الصمام عن طريق وصلة التعادل الخارجي .

٨.٧ الشطان

يُعْرَف الشطان بالتغير المستمر لمعدل سريان المبرد إلى المبخر ، فيزداد هذا المعدل حتى يصل إلى درجة طفح المبخر ، ثم يقل لدرجة عطش المبخر . يحدث الشطان نتيجة الفترة الزمنية التي يأخذها المبرد ليصل إلى البصيلة بعد أن يعدل الصمام فتحة دخول المبرد . ومن أهم عيوب الشطان التغير المتتابع لدرجة حرارة وضغط المبرد الخارج من المبخر ، مما يؤدي إلى خفض سعة التبريد . أيضاً ، يؤدي الشطان إلى طفح سائل المبرد إلى الضاغط إذا زاد معدل سريان المبرد عن الحد المطلوب لحمل التبريد .

ولتجنب حدوث الشطان أو التقليل منه ينصح بالآتي

أ) اختيار المقاس المناسب لصمام التمدد الثرموستاتي .

ب) اختيار فرق درجات التحميص الفوقي المناسب لعمل الصمام ، حيث إن من المعروف أن خفض فرق درجات التحميص الفوقي للبخار الخارج من المبخر يساعد عادة على احتمال حدوث الشطان .

جـ) اختيار الشحنة المناسبة للبصيلة الثرموستاتية .

د) تصميم المبخر بحيث يكون سريان المبرد داخله وكذا انتقال الحرارة موزعاً بالتساوي على أجزاء المبخر المختلفة .

هـ) تركيب البصيلة في الموضع الصحيح .

و) اختيار أفضل موضع لأنبوب تعادل الضغوط خارجياً .

مثال ٨.٤

يعمل صمام تمدد ثرموستاتي بشحنة سائلة من مبرد ١٢ في نظام تبريد . يعمل نظام التبريد بمبرد ١٢ ، أيضاً ، عند مكثف له درجة حرارة قدرها ٥٠ ° م ومبخر له درجة حرارة قدرها – ٢٠ ° م . ضُبِطَ صمام التمدد ليعطي ٢ ° م فرق درجات تحميص فوقي عند هذه الظروف للتشغيل ، وبإهمال فقد الضغط في المبخر . احسب فرق درجات التحميص الفوقي إذا كان فقد ضغط المبخر ٨ كيلوبسكال ، دون السماح بمعادلة الضغط خارجياً . كم يكون هذا الفرق إذا سُمِحَ باستخدام صمام تمدد معادل خارجياً .

الحل

من جداول مبرد ١٢ بملحق أ نجد الآتي

ضغط دخول المبخر عند درجة حرارها قدرها – ٢٠ ° م = ١٥١,٠٠ كيلوبسكال

درجة حرارة البصيلة = – ٢٠ – (–٢) = – ١٨ ° م

ضغط البصيلة (ضغط التشبع عند – ١٨° م) = ١٦١,٧ كيلوبسكال

ضغط الزنبرك = ١٦١,٧ – ١٥١,٠٠ = ١٠,٧ كيلوبسكال

بأخذ فقد ضغط المبخر في الحسابات نحصل على الآتي

فقد ضغط المبخر = ٨ كيلوبسكال

ضغط خروج المبخر = ١٥١,٠٠ – ٨ = ١٤٣,٠٠ كيلوبسكال

درجة حرارة التشبع عند الخروج من المبخر = – ٢١,٥ ° م

فرق درجات التحميص الفوقي = – ١٨ – (– ٢١,٥) = – ٣,٥ ° م

أي أن الفرق الفعلي لدرجات التحميص الفوقي هو ٣,٥ ° م وليس ٢ ° م ، مما يؤدي إلى تقليل المساحة الفعالة للمبخر .

باستخدام صمام تمدد معادل خارجياً نحصل على الآتي

ضغط المبخر عند الخروج = ١٤٣,٠٠ كيلوبسكال

ضغط البصيلة = ١٤٣.٠ + ١٠.٧ = ١٥٣.٧ كيلوبسكال

درجة حرارة البصيلة = – ١٩.٥ °م

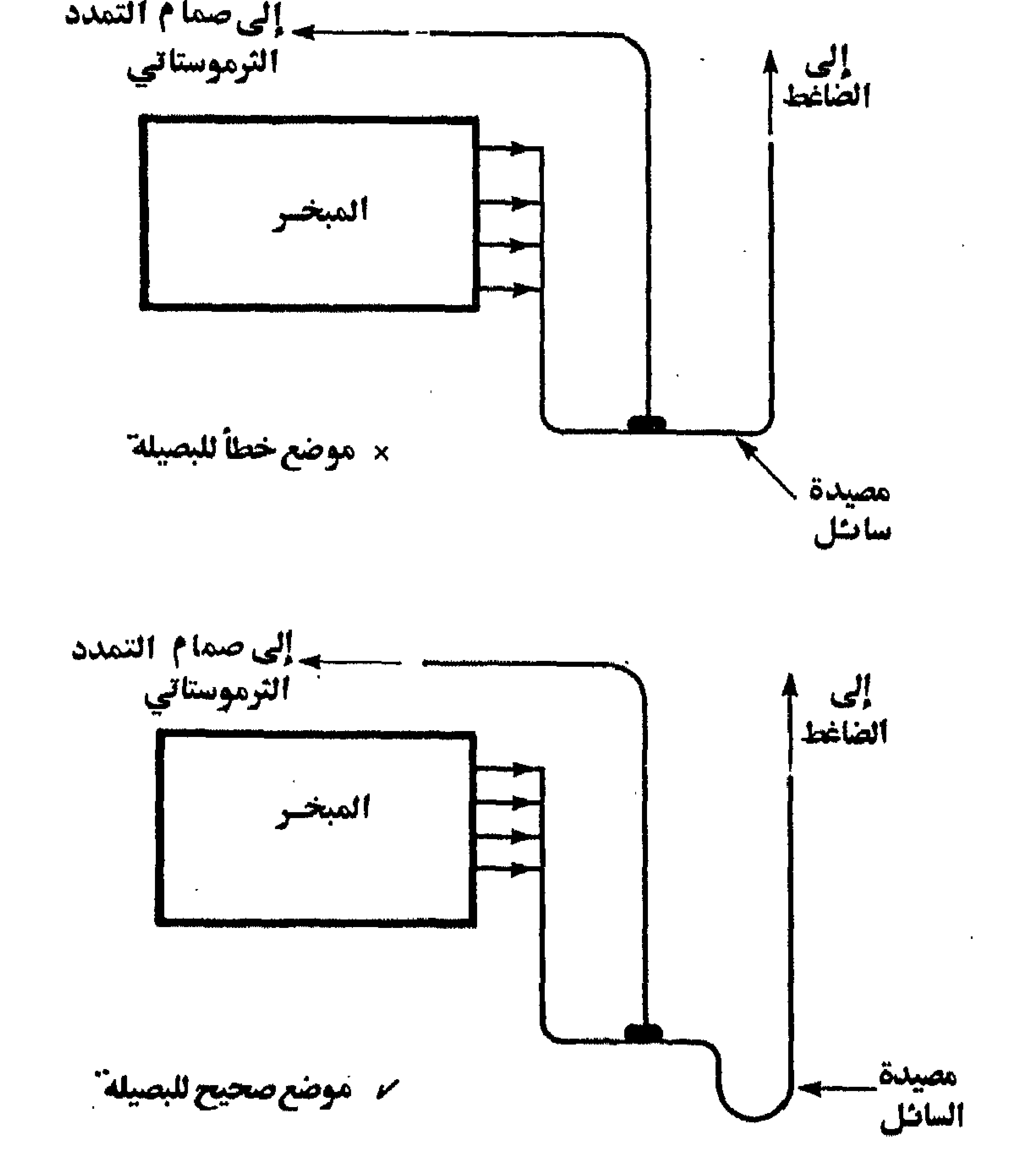
فرق درجات التحميص الفوقي = – ١٩.٥ – (– ٢١.٥) = ٢ °م

٨.٨ احتياطات تركيب صمام التمدد الثرموستاتي وبصيلته

للحصول علي أفضل أداء لصمام التمدد الثرموستاتي ينصح بوضع الصمام أقرب ما يكون للمبخر مع عدم وضع أي عائق أو معدات أخرى – ماعدا الموزع – بين الصمام والمبخر . كما يراعى أيضاً أن يوضع جسم الصمام – إذا حوت البصيلة شحنة غازية أو شحنة غازية مخالفة – في موضع دافئ نسبياً عن موضع البصيلة لتجنب تكثف بخار شحنة البصيلة داخل الأنبوب الشعري الواصل بين البصيلة وغشاء التحكم بالصمام .

يعتمد أداء صمام التمدد الثرموستاتي إلى حد كبير على ضغط البصيلة الذي يتأثر بشكل جلي بموضع وطريقة تركيب البصيلة . ومن الاحتياطات الأساسية التي يجب مراعاتها عند تركيب البصيلة أن تكون مثبتة جيداً إلى جزء أفقي من خط السحب بالقرب من المبخر ، ويفضل أن تكون في مكان مكيف حتى لا تتأثر بالعوامل الخارجية . ومن الضروري المحافظة على توصيل حراري جيد بين البصيلة وخط السحب في جميع الأحوال . وتركب البصيلة على السطح الخارجي لخط السحب وعند أعلى نقطة فيه إذا كان القطر الخارجي لخط السحب أقل من ٢.١ سم (٠.٨٧٥ بوصة) . أما إذا كان القطر الخارجي أكبر من ٢.١ سم (٠.٨٧٥ بوصة) فتوضع البصيلة عند زاوية ١٢٠ °م مع أعلى نقطة في خط السحب . ويراعى عزل البصيلة وخط السحب حرارياً لمسافة لا تقل عن ٣٠ سم من موضع البصيلة . كما ينصح بوضع البصيلة على مسافة لا تقل عن ٥٠ سم من جزء خط السحب الموجود في مكان غير مكيف ، أو مبرد ، لخفض التوصيل الحراري بين موضع البصيلة والجو الخارجي . ويجب أيضاً أن تكون البصيلة أقرب ما يمكن للمبخر .

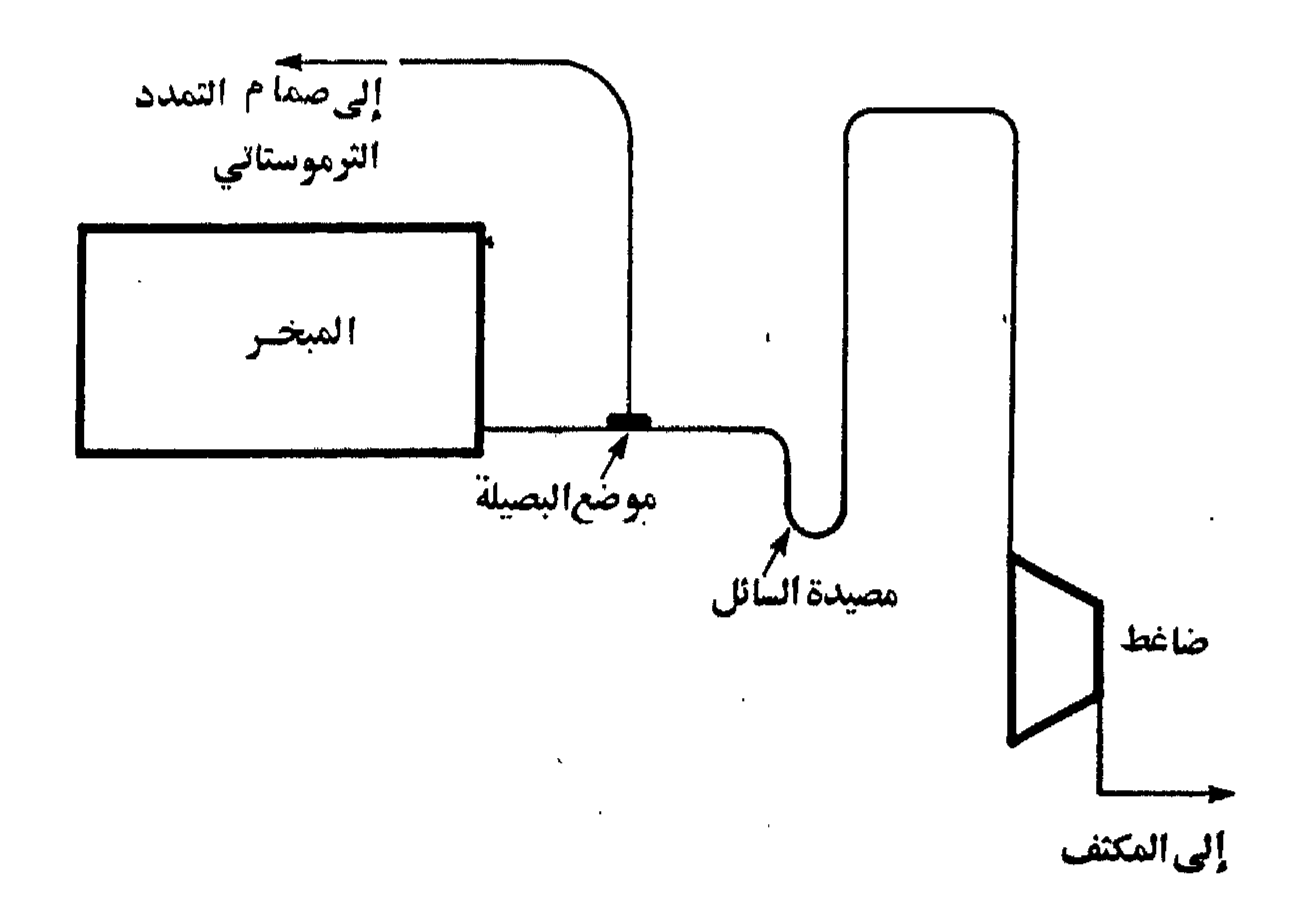
ويلاحظ في بعض الحالات ارتفاع درجة حرارة الجو المحيط بالبصيلة أثناء توقف نظام التبريد مما يؤدي إلى ارتفاع ضغط البصيلة فيفتح الصمام أثناء توقف الضاغط . وللتغلب على هذه المشكلة ينصح بتركيب صمام ذي ملف لولبي - يقفل تلقائياً عند إيقاف الضاغط - في خط السائل الداخل إلى الصمام مباشرة . ومن الحالات التي يجب تلافيها تركيب البصيلة على مصيدة السائل بخط السحب كما هو موضح بشكل ٨.١٢ حيث يسبب هذ التركيب الإحساس بدرجة حرارة غير واقعية ويؤدي إلى أداء غير منتظم



شكل ٨.١٢ كيفية تركيب البصيلة بالقرب من مصيدة السائل بخط السحب .

للصمام نتيجة تغير منسوب السائل بالمصيدة باستمرار . ويوضح الشكل الموضع الصحيح للبصيلة في هذه الحالة .

وينصح عادة بعدم تركيب البصيلة على جزء رأسي من خط السحب ، فإذا لم يتوفر جزء أفقي بالشروط السابقة الذكر ، ينصح بتركيبها على الجزء الرأسي بعد مصيدة السائل مباشر ، مع مراعاة أن تكون وصلة الأنبوب الشعري للبصيلة عند أعلى نقطة ممكنة لها . ومن الحالات الأخرى التي تتطلب العناية بتركيب البصيلة حالة المبخرات الأعلى في المستوى من الضاغط ، وينصح عندئذ بتصميم خط السحب وتثبيت البصيلة كما هو موضح بشكل ٨.١٣ . أما إذا حوى نظام التبريد مبادلاً حرارياً بين البخار الخارج من المبخر وبين السائل العائد من المكثف ، فتثبت البصيلة على خط السحب الخارج من المبادل الحراري لزيادة قدرة التبريد . ويجب عندئذ تحديد موضع البصيلة بدقة لمنع حدوث شطنان . ويتم هذا عادة بتجريب عدة مواضع مختلفة للتأكد من عدم حدوث الشطنان .



شكل ٨.١٣ كيفية تركيب البصيلة إذا كان المبخر فى مستوى أعلى من مستوى الضاغط .

ومن الصعوبات التي قد تحول دون تركيب البصيلة بالمواصفات والاحتياطات السابقة ، أن يكون خط السحب قصيراً جداً ، أو أن يستخدم الصمام فرق درجات تحميص صغير ، أو أن يكون القطر الخارجي لخط السحب كبيراً جداً (أكبر من ٢ بوصة) . وينصح في هذه الحالات تركيب البصيلة داخل تجويف خاص داخل خط السحب لزيادة حساسية البصيلة ، ولحماية الضاغط من احتمال طفح سائل المبرد إليه .

٨.٩ جداول اختيار صمام التمدد الثرموستاتي

يقوم مصنعو صمامات التمدد الثرموستاتية بإعداد جداول تسهل على مهندسي التبريد اختيار صمام التمدد الثرموستاتي المناسب لاحتياجهم . ويبين جدول ٨.٢ واحداً من هذه الجداول [شركة باركر بالولايات المتحدة الأمريكية] لمبرد ٢٢ . ولاختيار صمام تمدد ثرموستاتي لأحد نظم التبريد يجب اتباع الخطوات الآتية

أ) احسب فقد الضغط المطلوب خلال الصمام . ويكون هذا الفرق مساوياً الفرق بين ضغط المكثف وضغط المبخرمطروحاً منه فقد الضغط في المكونات المختلفة بين المكثف ودخول الصمام ، مثل : فقد الضغط في المكثف وأنابيب المبرد والمصفاة وصمامات الملف اللولبي ، والمرشح والمجفف والموزع ، أو غيرها حسب نظام التبريد المستخدم . أيضاً ، يجب أن يؤخذ في الاعتبار فقد الضغط الناتج عن اكتساب المبرد لطاقة وضع ، نتيجة سريان هذا المبرد إلى أعلى عندما يكون صمام التمدد في مستوى أعلى من مستوى المكثف .

ب) من جدول ٨.٢ ، أو مايماثلها للمبردات الأخرى ، اختر صمام التمدد بسعة التبريد المطلوبة لنظام التبريد ، أو أكبر منها قليلاً .

جـ) من جدول التصحيح أسفل جدول ٨.٢ احسب معامل التصحيح لدرجة حرارة سائل المبرد عند دخول الصمام .

جدول ٨.٢ جدول اختيار صمامات التمدد الثرموستاتي لمبرد ٢٢ [شركة باركر – الولايات المتحدة الأمريكية].

EVAPORATOR TEMP.			40°F						20°F						0°F					
PRESSURE DROP (PSI)			75	100	125	150	175	200	75	100	125	150	175	200	75	100	125	150	175	200
Valve Type	Capacity Range (tons)	Maximum Capacity (tons)																		
D		½	0.44	0.50	0.56	0.61	0.66	0.71	0.41	0.48	0.53	0.58	0.63	0.67	0.35	0.41	0.46	0.50	0.54	0.58
D		1	0.87	1.00	1.12	1.22	1.32	1.41	0.79	0.91	1.02	1.11	1.20	1.28	0.71	0.82	0.91	1.00	1.08	1.15
N,I	½ - 1	1	0.87	1.00	1.12	1.22	1.32	1.41	0.79	0.91	1.02	1.11	1.20	1.28	0.71	0.82	0.91	1.00	1.08	1.15
C,S,H	½ - 1½	1½	1.30	1.50	1.68	1.84	1.98	2.12	1.18	1.34	1.53	1.67	1.80	1.93	1.06	1.18	1.37	1.50	1.62	1.73
D		1½	1.30	1.50	1.68	1.84	1.98	2.12	1.18	1.34	1.53	1.67	1.80	1.93	1.06	1.18	1.37	1.50	1.62	1.73
I	1½ - 2	2	1.73	2.00	2.24	2.45	2.65	2.83	1.65	1.90	2.12	2.33	2.51	2.69	1.40	1.62	1.81	1.98	2.14	2.29
D		2½	2.18	2.50	2.80	3.05	3.30	3.53	2.05	2.38	2.65	2.90	3.15	3.35	1.75	2.03	2.28	2.48	2.68	2.88
D		3	2.60	3.00	3.35	3.67	3.97	4.24	2.33	2.69	3.01	3.29	3.56	3.80	2.06	2.38	2.66	2.91	3.15	3.37
N	1½ - 3	3	2.60	3.00	3.35	3.67	3.97	4.24	2.33	2.69	3.01	3.29	3.56	3.80	2.06	2.38	2.66	2.91	3.15	3.37
D		4	3.48	4.00	4.48	4.88	5.28	5.64	3.28	3.80	4.24	4.64	5.04	5.36	2.80	3.24	3.64	3.96	4.28	4.60
C,S,H	1½ - 5	5	4.33	5.00	5.59	6.12	6.61	7.07	3.89	4.49	5.02	5.50	5.94	6.35	3.45	3.98	4.45	4.87	5.26	5.63
D		5	4.33	5.00	5.59	6.12	6.61	7.07	3.89	4.49	5.02	5.50	5.94	6.35	3.45	3.98	4.45	4.87	5.26	5.63
C,S,H	5½ - 7½	7½	6.50	7.50	8.39	9.19	9.92	10.61	5.62	6.49	7.26	7.95	8.58	9.18	4.75	5.48	6.13	6.71	7.24	7.75
S,H	8 - 10	10	8.66	10.0	11.2	12.3	13.2	14.1	8.23	9.50	10.6	11.6	12.6	13.4	7.01	8.10	9.06	9.92	10.7	11.5
R		10	8.70	10.0	11.2	12.2	13.2	14.1	8.20	9.50	10.6	11.6	12.6	13.4	7.00	8.10	9.10	9.90	10.7	11.5
R		15	13.1	15.0	16.8	18.3	19.8	21.2	12.3	14.3	15.9	17.4	18.9	20.1	10.5	12.2	13.7	14.9	16.1	17.3
R		20	17.4	20.0	22.4	24.4	26.4	28.2	16.4	19.0	21.2	23.2	25.2	26.8	14.0	16.2	18.2	19.8	21.4	23.0
R		30	26.0	30.0	33.5	36.7	39.7	42.4	22.5	26.0	29.0	31.8	34.3	36.7	19.0	21.9	24.5	26.8	29.0	31.0
R		40	34.8	40.0	44.8	48.8	52.8	56.4	32.8	38.0	42.4	46.4	50.4	53.6	28.0	32.4	36.4	39.6	42.8	46.0
R		70	60.6	70.0	78.3	85.7	92.6	99.0	52.4	60.6	67.7	74.2	80.1	85.6	44.3	51.1	57.1	62.6	67.6	72.3
F		26	22.5	26.0	29.1	31.8	34.4	36.8	22.0	25.4	28.4	31.0	33.6	35.9	18.1	20.9	23.4	25.6	27.7	29.6
F		34	29.4	34.0	38.0	41.6	45.0	48.1	28.7	33.2	37.1	40.5	43.9	46.9	23.6	27.3	30.6	33.5	36.2	38.8
F		42	36.4	42.0	47.0	51.4	55.6	59.4	35.5	41.0	45.9	50.1	54.3	58.0	29.3	33.8	27.8	41.3	44.7	47.9
F		59	51.1	59.0	66.0	72.3	78.0	83.4	49.8	57.6	64.4	70.3	76.2	81.4	41.0	47.4	53.1	58.1	62.8	67.3
F		76	65.8	76.0	85.0	93.1	100.5	107.5	64.2	74.2	83.0	90.6	98.2	104.9	52.9	61.1	68.4	74.8	80.9	86.6
F		93	80.5	93.0	104.0	113.9	123.0	131.5	78.6	90.8	101.6	110.9	120.2	128.3	64.8	74.8	83.7	91.5	99.0	106.0
EVAPORATOR TEMP.			-10°F						-20°F						-40°F					
PRESSURE DROP (PSI)			100	125	150	175	200	225	125	150	175	200	225	250	125	150	175	200	225	250
Valve Type	Capacity Range (tons)	Maximum Capacity (tons)																		
D		1/2	0.36	0.40	0.44	0.47	0.50	0.54	0.35	0.38	0.41	0.44	0.47	0.49	0.26	0.28	0.31	0.33	0.35	0.37
D		1	0.77	0.86	0.94	1.01	1.08	1.15	0.81	0.88	0.95	1.01	1.08	1.14	0.70	0.77	0.83	0.88	0.94	0.99
N,I	½ - 1	1	0.77	0.86	0.94	1.01	1.08	1.15	0.81	0.88	0.95	1.01	1.08	1.14	0.70	0.77	0.83	0.88	0.94	0.99
C,S,H	½ - 1½	1½	1.09	1.29	1.42	1.53	1.63	1.73	1.22	1.33	1.44	1.54	1.63	1.72	1.06	1.16	1.26	1.34	1.42	1.50
D		1½	1.09	1.29	1.42	1.53	1.63	1.73	1.22	1.33	1.44	1.54	1.63	1.72	1.06	1.16	1.26	1.34	1.42	1.50
I	1½ - 2	2	1.42	1.59	1.74	1.88	2.01	2.13	1.39	1.52	1.64	1.75	1.86	1.96	1.23	1.33	1.42	1.50	1.62	1.68
D		2½	1.78	1.98	2.18	2.35	2.50	2.68	1.72	1.90	2.05	2.20	2.33	2.45	1.28	1.40	1.53	1.63	1.72	1.83
D		3	2.23	2.49	2.72	2.95	3.15	3.35	2.32	2.53	2.74	2.93	3.11	3.27	1.97	2.15	2.33	2.49	2.64	2.78
N	1½ - 3	3	2.23	2.49	2.72	2.95	3.15	3.35	2.32	2.53	2.74	2.93	3.11	3.27	1.97	2.15	2.33	2.49	2.64	2.78
D		4	2.84	3.16	3.48	3.76	4.00	4.28	2.76	3.04	3.28	3.52	3.72	3.92	2.04	2.24	2.44	2.60	2.76	2.92
C,S,H	1½ - 5	5	3.73	4.17	4.56	4.92	5.26	5.58	3.88	4.25	4.59	4.90	5.21	5.49	3.31	3.62	3.91	4.18	4.44	4.68
D		5	3.73	4.17	4.56	4.92	5.26	5.58	3.88	4.25	4.59	4.90	5.21	5.49	3.31	3.62	3.91	4.18	4.44	4.68
C,S,H	5½ – 7½	7½	4.97	5.56	6.09	6.57	7.03	7.49	4.99	5.47	5.90	6.31	6.70	7.05	3.86	4.23	4.56	4.88	5.18	5.45
S,H	8 - 10	10	7.10	7.94	8.70	9.39	10.0	10.7	6.93	7.59	8.20	8.77	9.30	9.80	5.14	5.63	6.09	6.51	6.90	7.27
R		10	7.10	7.90	8.70	9.40	10.0	10.7	6.90	7.60	8.20	8.80	9.30	9.80	5.10	5.60	6.10	6.50	6.90	7.30
R		15	10.7	11.9	13.1	14.1	15.0	16.1	10.4	11.4	12.3	13.2	14.0	14.7	7.65	8.40	9.15	9.75	10.4	11.0
R		20	14.2	15.8	17.4	18.8	20.0	21.4	13.8	15.2	16.4	17.6	18.6	19.6	10.2	11.2	12.2	13.0	13.8	14.6
R		30	19.9	22.2	24.3	26.3	28.1	29.9	20.0	21.9	23.6	25.2	26.8	28.3	15.4	16.9	18.3	19.5	20.7	21.8
R		40	28.4	31.6	34.8	37.6	40.0	42.8	27.6	30.4	32.8	35.2	37.2	39.2	20.4	22.4	24.4	26.0	27.6	29.2
R		70	46.4	51.8	56.8	61.4	65.6	69.8	46.6	51.0	55.1	58.9	62.5	65.9	36.0	39.4	42.6	45.5	48.3	50.9
F		26	17.6	19.7	21.4	23.2	24.9	26.3	16.2	17.8	19.2	20.6	21.8	23.0	10.9	11.9	12.8	13.6	14.5	15.3
F		34	23.0	25.7	28.0	30.3	32.5	34.4	21.2	23.3	25.2	26.9	28.6	30.1	14.1	15.5	16.7	17.8	18.9	20.0
F		42	28.4	31.8	34.6	37.5	40.2	42.5	26.2	28.7	31.1	33.3	35.3	37.1	17.5	19.2	20.7	22.0	23.4	24.7
F		59	39.9	44.6	48.6	52.6	56.4	59.7	36.8	40.4	43.7	46.7	49.6	52.2	24.6	26.9	29.0	30.9	32.8	34.7
F		76	51.4	57.5	62.6	67.8	72.7	76.9	47.4	52.0	56.2	60.2	63.8	67.2	31.7	34.7	37.4	39.8	42.3	44.7
F		93	62.9	70.3	76.6	83.0	88.9	94.1	58.0	63.6	68.8	73.7	78.1	82.2	38.7	42.4	45.8	48.7	51.7	54.7

Liquid Refrigerant Temperature Correction Factor

Liquid Line Temp	70°F	80°F	90°F	100°F	110°F	120°F	130°F	140°F
Multiplier R-22	1.18	1.12	1.06	1.00	.942	.883	.823	.767

These ratings are based on vapor free 100°F liquid refrigerant entering the expansion valve, and a maximum of 7°F change in superheat.

د) احسب سعة تبريد الصمام بعد التعديل ، بضرب معامل التصحيح السابق في قيمة سعة التبريد من الجدول .

هـ) حدد نوع شحنة البصيلة المطلوبة للصمام . وتحدد هذه الشحنة تبعاً للتطبيق المستخدم ونوع المبرد الموجود بنظام التبريد . ولقد قسم مصنعو صمامات التمدد تطبيقات التبريد – تبعاً لنوع الشحنة المستخدمة – إلى الأقسام الأربعة الآتية :

- تبريد سوائل دون تجميدها
- تبريد عند درجات حرارة منخفضة (أقل من –١٥ ° م عادة)
- تبريد تجاري (أي عند درجات حرارة متوسطة ، أعلى من – ١٥ ° م عادة)
- تكييف هواء .

ز) قرر حاجة الصمام إلى معادلة خارجية للضغوط أم لا ، وذلك بمقارنة فقد ضغط المبخر بالقيمة الموصى بها بجدول ٨.١ . تذكر ضرورة استخدام أنبوب تعادل ضغوط خارجي إذا حوى نظام التبريد موزع مبرد قبل دخول المبخر .

ويمكن للقارئ استخدام معاملات تحويل الوحدات بملحق ب بالكتاب للتحويل بين وحدات النظام الإنجليزي بجدول ٨.٢ ووحدات النظام الدولي المستخدمة في الكتاب الحالي .

مثال ٨.٥

اختر صمام تمدد ثرموستاتي يعمل بنظام تكييف هواء بمبرد ٢٢ ، بين درجة حرارة مكثف قدرها ٥٠ ° م ودرجة حرارة ٤.٥ ° م ، وبسعة تبريد اسمية قدرها ٨٠ كيلووات . افرض فقد ضغط إجمالي قدره ٢٣٥ كيلوبسكال في خطوط أنابيب سائل المبرد ، وفي صمام ملف لولبي ومصفاة قبل دخول صمام التمدد ، أيضاً افرض ١٠ ° م تبريد تحتي عند خروج المكثف ، وفقد ضغط قدره ٣٥ كيلوبسكال في المبخر .

الحل

من جداول مبرد ٢٢ بملحق أ نجد الآتي

ضغط المبخر عند ٤,٥ °م = ٥٧٤ كيلوبسكال

ضغط المكثف عند ٥٠ °م = ١٩٤٣ كيلوبسكال

درجة حرارة المبرد عند الخروج من المكثف = ٥٠ - ١٠ = ٤٠ °م

ضغط التشبع عند ٤٠ °م = ١٥٣٤ كيلوبسكال

ضغط المبرد عند دخول الصمام = ١٩٤٣ - ٣٣٥ = ١٦٠٨ كيلوبسكال

وحيث أن ضغط دخول المبرد إلى الصمام أكبر من ضغط التشبع عند ٤٠ °م فإن المبرد يدخل إلى الصمام في الحالة السائلة . يحسب فرق الضغط بين دخول وخروج الصمام كما يلي

فرق ضغط تشغيل الصمام = ١٦٠٨ - ٥٧٤ = ١٠٣٤ كيلوبسكال

تحول جميع الوحدات الآن إلى الوحدات الإنجليزية باستخدام ملحق ب ، أي أن

سعة التبريد الاسمية = ٨٠ ÷ ٣,٥٢ = ٢٢,٧٣ طن تبريد

درجة حرارة المبخر = ٤,٥ °م ≈ ٤٠ °ف

درجة حرارة سائل المبرد عند دخول الصمام = ٤٠ °م = ١٠٤ °ف

فرق ضغط تشغيل الصمام = ١٠٣٤ ÷ ٦,٨٩ = ١٥٠ رطل / بوصة ٢

من جدول ٨,٢ نجد أن الصمام الذي يحقق هذه الشروط هو نمط R بسعة تبريد قصوى ٢٠ طن تبريد . ويكون معامل تصحيح درجة حرارة دخول السائل هو ٠,٩٧٧ . وتقدر سعة تبريد الصمام عندئذ كما يلي

سعة التبريد = سعة التبريد من الجدول × معامل تصحيح درجة حرارة دخول سائل المبرد

= ٢٤,٤ × ٠,٩٧٧ = ٢٣,٨ طن تبريد

أي أكبر من سعة التبريد الاسمية للنظام بقدر يسير . وبمقارنة فقد الضغط في المبخر وقدره ٣٥ كيلوبسكال بالقيمة الموصى بها في جدول ٨,١ وقدرها ٢٠ كيلوبسكال ، يلزم

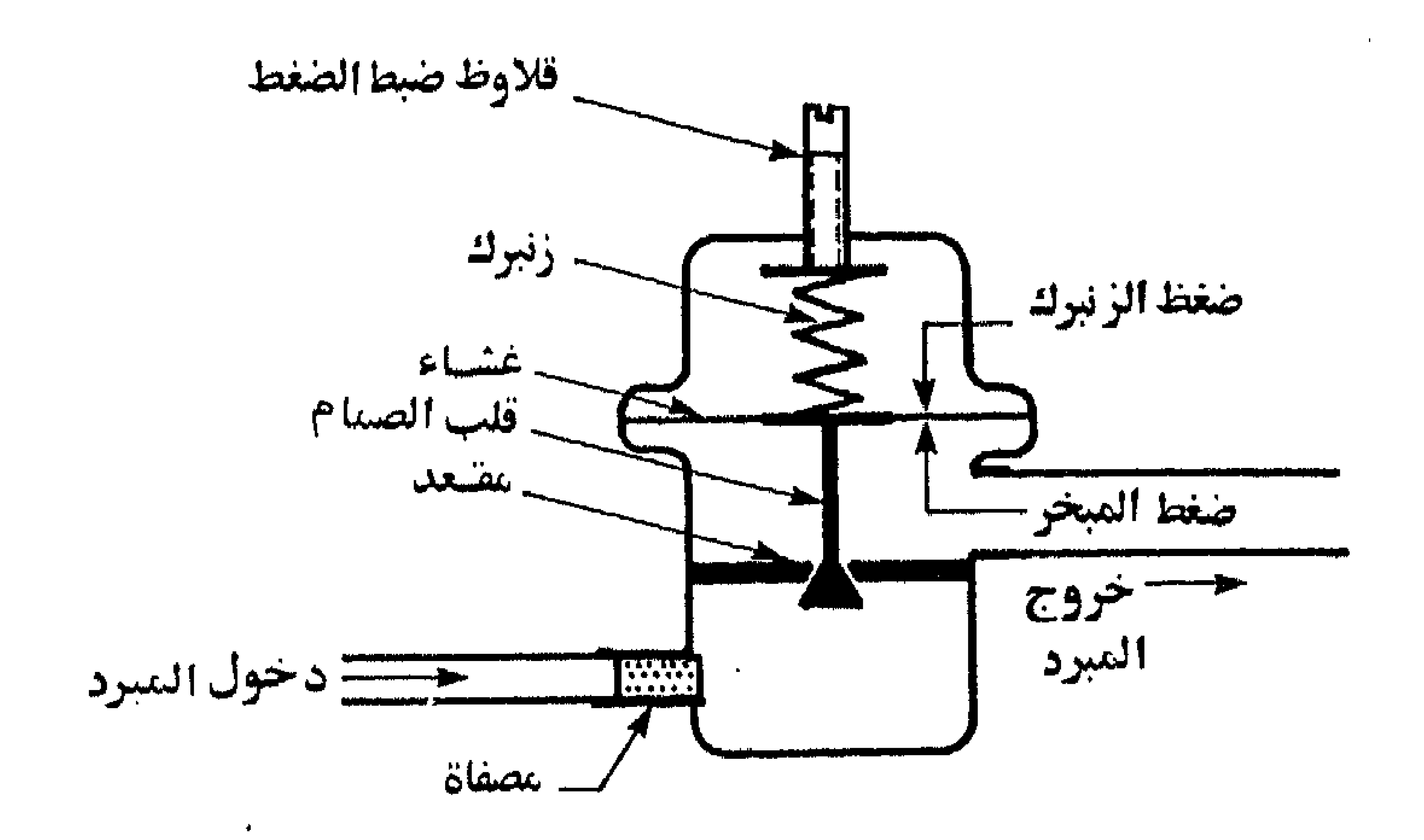
استخدام أنبوب لمعادلة الضغوط خارجياً . ويكون التصميم النهائي للصمام هو :

- صمام نمط R بسعة تبريد قصوى قدرها ٢٠ طن تبريد للعمل مع مبرد ٢٢
- يحتاج الصمام إلى أنبوب معادلة ضغوط خارجياً .
- تختار شحنة البصيلة لتعمل مع نظام تكييف هواء .

٨.١٠ صمام التمدد الأوتوماتي

يُعْرَف هذا النوع من الصمامات أيضاً باسم صمامات تمدد الضغط الثابت . وتعمل هذه الصمامات على تمدد المبرد من المكثف إلى المبخر مع المحافظة على ضغط المبخر ثابتاً .

يتكون الصمام ، كما هو موضح بشكل ٨.١٤ ، من غشاء ، وزنبرك تحكم ، وقلب الصمام ، ومقعد . وتؤثر على الغشاء قوتان متضادتان في الاتجاه : قوة ضغط الزنبرك من أعلى وقوة ضغط المبخر من أسفل . ويتم الاتزان عند تساوي هاتين القوتين ، فإذا زاد ضغط المبخر عن ضغط الزنبرك تحرك الغشاء لأعلى ، أي في اتجاه الإغلاق ، فيقل معدل سريان

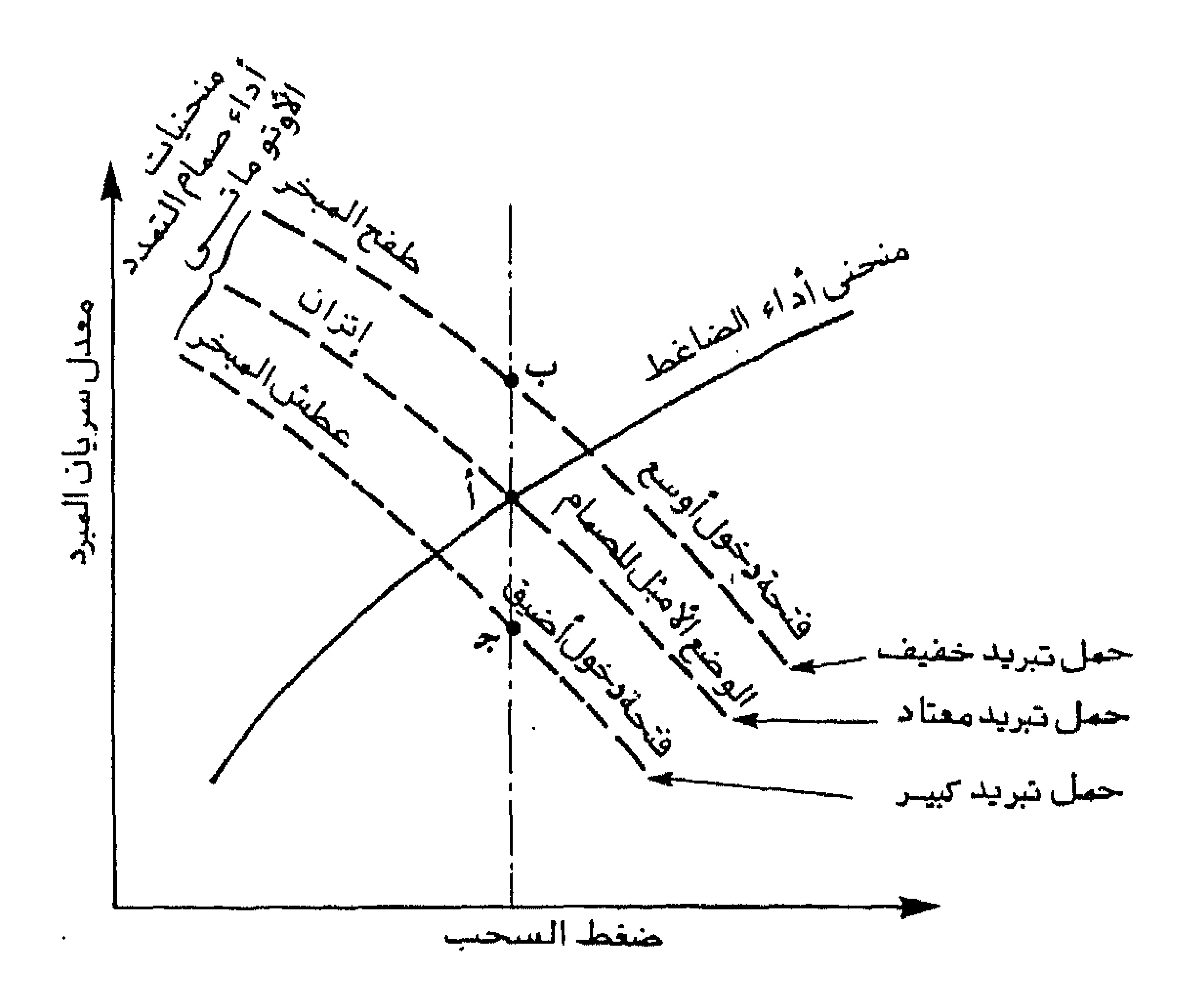


شكل ٨.١٤ رسم تخطيطي لصمام تمدد أوتوماتي .

المبرد وبالتالي ينخفض ضغط المبخر . أما إذا انخفض ضغط المبخر عن ضغط الزنبرك ، تحرك الغشاء لأسفل ، أي في اتجاه الفتح ، فيزيد معدل سريان المبرد ، وبالتالي يرتفع ضغط المبخر .

يتحكم صمام التمدد الأوتوماتي في سريان المبرد من المكثف إلى المبخر بمعادلة تماثل المعادلة ٨.٣ ، حيث الرموز لها نفس المعنى . وبناء على ذلك ، يتحكم الصمام في سعة تبريد النظام المصاحب له تبعاً للمعادلة ٨.٥ .

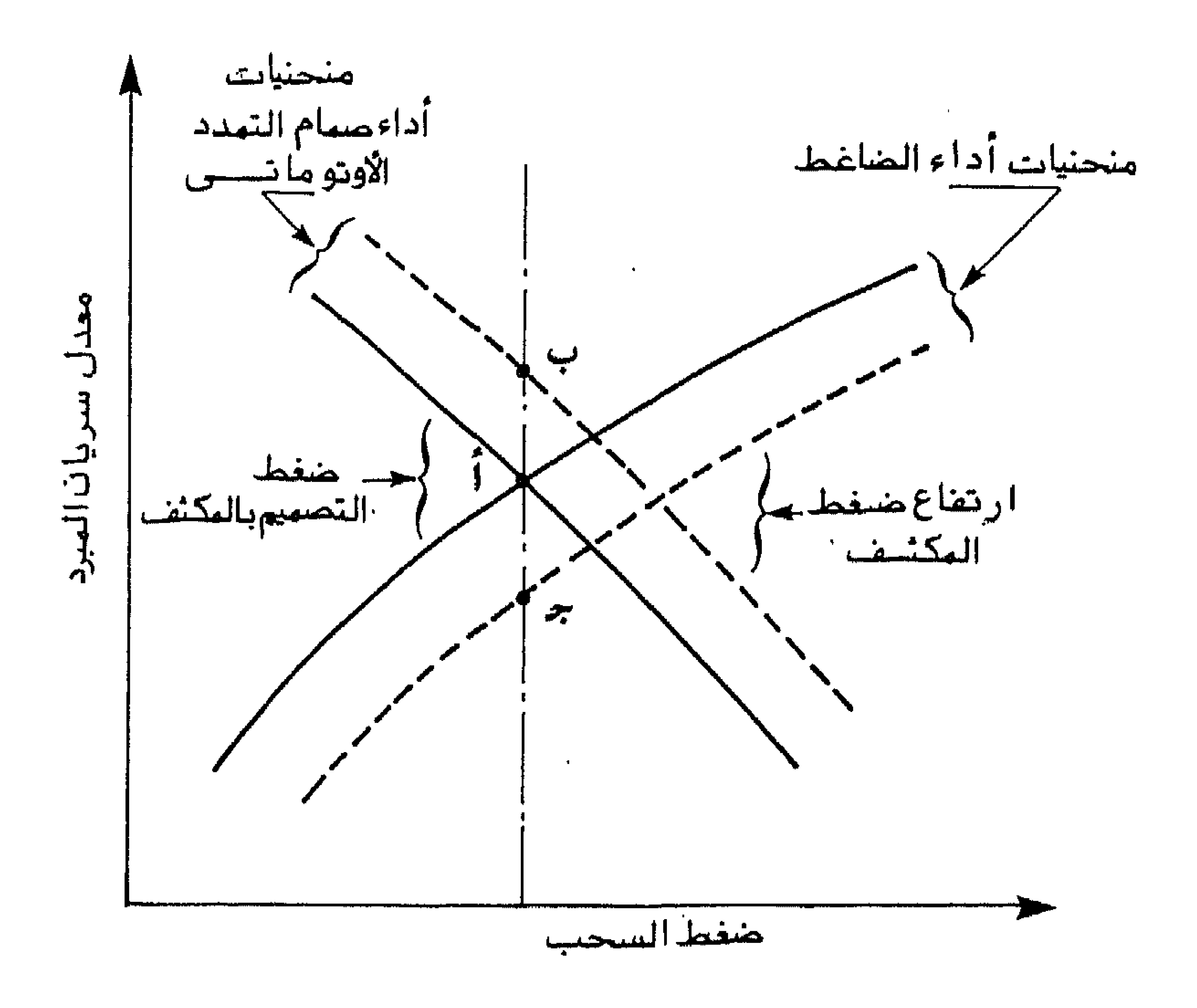
وللتعرف على أداء صمام التمدد الأوتوماتي دعنا ندرس العلاقة بين معدل سريان المبرد خلال الصمام وضغط المبخر تبعاً للمعادلة ٨.٣ ، وذلك بفرض ثبات ضغط المكثف وثبات فتحة سريان المبرد بالصمام . بزيادة ضغط المبخر يقل معدل السريان كما هو موضح بشكل ٨.١٥ ، حيث يوضح كل منحنى فتحة معينة بالصمام . وتختلف العلاقة بين سريان المبرد خلال الضاغط وضغط السحب (أي ضغط المبخر) عن العلاقة الخاصة بالصمام ، فهي علاقة طردية أي يزداد معدل السريان كلما ارتفع ضغط المبخر ، وذلك بفرض ثبات ضغط الطرد (أي ضغط المكثف) أيضاً كما هو موضح بشكل ٨.١٥ . وتمثل الحالة أ وضع اتزان الضاغط والصمام عند فتحة معينة له . وبزيادة حمل التبريد ترتفع درجة الحرارة داخل المبخر وبالتالي يرتفع ضغط المبخر ، فيتحرك غشاء الصمام إلى أعلى في اتجاه الإغلاق فينخفض ضغط المبخر إلى قيمة الاتزان عند الحالة جـ (انظر الشكل) . عند هذه الحالة يسمح الصمام بمرور مبرد أقل من المطلوب بالضاغط (قارن الحالة جـ بالحالة أ) مسبباً عطش المبخر . أما إذا انخفض حمل التبريد عن حمل التصميم فإن درجة حرارة المبخر تبدأ في الانخفاض وبالتالي ينخفض ضغط المبخر أيضاً ، فيتحرك الغشاء إلى أسفل في اتجاه الفتح ، فيرتفع الضغط داخل المبخر إلى ضغط الاتزان عند الحالة ب . عند وضع الاتزان ب يسمح الصمام بمرور مبرد بمعدل أكبر من المطلوب بالضاغط ، فيطفح الضاغط بسائل المبرد من المبخر (قارن الحالة أ بالحالة ب بالشكل) .



شكل ٨.١٥ أداء صمام تمدد أوتوماتي عند تغير حمل التبريد ، مع ثبات ضغط المكثف ، أثناء دورة تشغيل الضاغط .

فيما سبق تعرفنا على أداء صمام التمدد الأوتوماتي عند تغير حمل التبريد . ندرس الآن أداء الصمام عند تغير ضغط المكثف . نبدأ أولاً بضغط معتاد بالمكثف حيث يعمل الصمام عند نقطة الاتزان الممثلة بالحالة أ في شكل ٨.١٦ ، وهي حالة اتزان صمام التمدد الأوتوماتي والضاغط عند حمل التبريد الاسمي (أي الحمل الذي تم على أساسه اختيار الصمام للعمل مع نظام التبريد) . بارتفاع ضغط المكثف ، يزيد معدل السريان خلال الصمام، تبعاً للمعادلة ٨.٣ ، مع المحافظة على ضغط المبخر ثابتاً . يعمل الصمام عندئذ عند الحالة ب . يسبب ارتفاع ضغط المكثف أيضاً انخفاض معدل المبرد الذي يسحبه الضاغط من المبخر * ، ويعمل الضاغط عند الحالة جـ بشكل ٨.١٦ . يتضح من الشكل أن صمام التمدد

* بفرض ضاغط ترددي ، ويمكن الرجوع إلى الفصل الخامس لمزيد من التفاصيل



شكل ٨.١٦ أداء صمام تمدد أوتوماتي مع زيادة ضغط المكثف عن قيمة التصميم ، عند ثبات حمل التبريد .

الأوتوماتي يعطي سرياناً أكبر مما يستطيع الضاغط مناولته ، ويسبب هذا طفحاً لسائل المبرد من المبخر إلى الضاغط .

ولحماية النظم المستخدمة لصمام التمدد الأوتوماتي من احتمال طفح سائل المبرد إلى الضاغط ، يثبت ثرموستات علي وصلة خط السحب إلى المبخر . يعمل هذا الثرموستات على إيقاف موتور الضاغط إذا انخفضت درجة حرارة خروج المبخر عن نقطة ضبط الثرموستات . وتضبط درجة حرارة القطع بالثروستات لتكون مساوية لدرجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المبخر (أو أعلى منها بدرجة أو درجتين) . فإذا زاد معدل سريان المبرد خلال الصمام – نتيجة انخفاض حمل التبريد (انظر شكل ٨.١٥) أو نتيجة ارتفاع ضغط المكثف (انظر شكل ٨.١٦) – عن معدل البخار الذي يسحبه الضاغط ، تجمع

سائل المبرد في المبخر حتى يصل إلى وصلة الخروج من المبخر ، فتنخفض درجة الحرارة ويعمل الثرموستات فوراً على إيقاف موتور الضاغط ، فيرتفع ضغط المبخر ويغلق الصمام كلية . مع وجود حمل تبريد يتبخر سائل المبرد بالمبخر ، فترتفع درجة حرارة خط السحب الواصل بالمبخر ، فيعمل الثرموستات على تشغيل موتور الضاغط مرة أخرى .

ومن أهم استعمالات صمام التمدد الأوتوماتي استخدامه لحماية المبخر من تكوين ثلج إذا انخفض حمل التبريد لمدة طويلة (على سبيل المثال في مبردات المياه) . كما يستخدم هذا الصمام لحماية موتور الضاغط عند زيادة حمل التبريد ، لمحافظته على ضغط المبخر ثابتاً دائماً . ويستخدم صمام التمدد الأوتوماتي عادة في الوحدات الصغيرة (ذات حمل تبريد أقل من ٣٠ كيلووات) التي لها حمل تبريد ثابت نسبياً مثل الثلاجات المنزلية وثلاجات عرض وبيع الأطعمة بالإضافة إلى بعض وحدات تكييف الهواء .

وبرغم المميزات السابقة لاستخدام صمام التمدد الأوتوماتي ، هناك الكثير من العيوب التي تحد من انتشار هذه الصمامات في التطبيقات المختلفة ، ومن أهم هذه العيوب الآتي :

أ) يعمل الصمام بافتراض حمل تبريد ثابت نسبياً . ويسبب الصمام طفح المبخر إذا انخفض الحمل عن الحمل المعتاد أو عطش المبخر إذا زاد الحمل عن الحمل المعتاد ، كما وضحنا سابقاً .

ب) يسبب الصمام طفح سائل المبرد من المبخر إلى الضاغط (إذا لم يحوي نظام التبريد وسيلة حماية من ذلك الخطر) - وبالتالي تلف الضاغط - إذا انخفض حمل التبريد عن المعدل المعتاد .

جـ) يعمل الضاغط الموجود بنظام تبريد يحوي صمام تمدد أوتوماتي بنسبة ضغوط مرتفعة دائماً ، حتى إذا انخفض حمل التبريد عن معدله المعتاد .

د) لا يمكن للصمام معادلة أي تغيرات في ضغط المكثف كما بينا سابقاً .

هـ) يُغلَق الصمام تلقائياً عند إيقاف الضاغط ، وبالتالي يحتاج الضاغط إلى عزم كبير عند بدء التشغيل ، مالم تكن هناك وسيلة لمعادلة الضغوط .

مثال ٨.٦

يعمل صمام تمدد أوتوماتي بالتحكم في سريان مبرد ٢٢ بنظام تبريد لثلاجة حفظ مشروبات . يعمل نظام التبريد عند درجة حرارة مكثف قدرها ٤٦ ° م ودرجة حرارة مبخر قدرها ٢ ° م وله حمل تبريد اسمي قدره ١٠ كيلووات . بفرض ٦ ° م فرق درجات تبريد تحتي عند الدخول لصمام التمدد و ٢ ° م فرق درجات تحميص فوقي عند الخروج من المبخر، وبفرض أن صمام التمدد يعمل بفتحة سريان – عند حمل التبريد الاسمي – تعادل ٧٠٪ من أقصى فتحة سريان له ، احسب أقصى مساحة بالصمام . يمكن فرض أن قيمة معامل السريان بالصمام تساوي ٧٥ . ٠ .

الحل

من جداول خواص مبرد ١٢ في ملحق أ نجد الخواص عند الحالات ١، ٢، ٣، ٤ بشكل ٨.٥ (يلاحظ استخدام صمام تمدد أوتوماتي بدلاً من صمام التمدد الثرموستاتي الموضح بالشكل)

$P_3 = 1771 \quad kPa \qquad\qquad P_1 = 531 \quad kPa$

$h_3 = 249.4 \quad kJ/kg \qquad\qquad h_1 = 406 \quad kJ/kg$

$\rho_3 = 1101.4 \quad kg/m^3$

تحسب أقصى مساحة لسريان المبرد بالصمام من معادلة ٨.٥ كما يلي

$$A_m = \frac{10}{0.75 \times 0.7 \times (406 - 249.4)\sqrt{2 \times 1101.4 \times (1771\text{-}531)}}$$

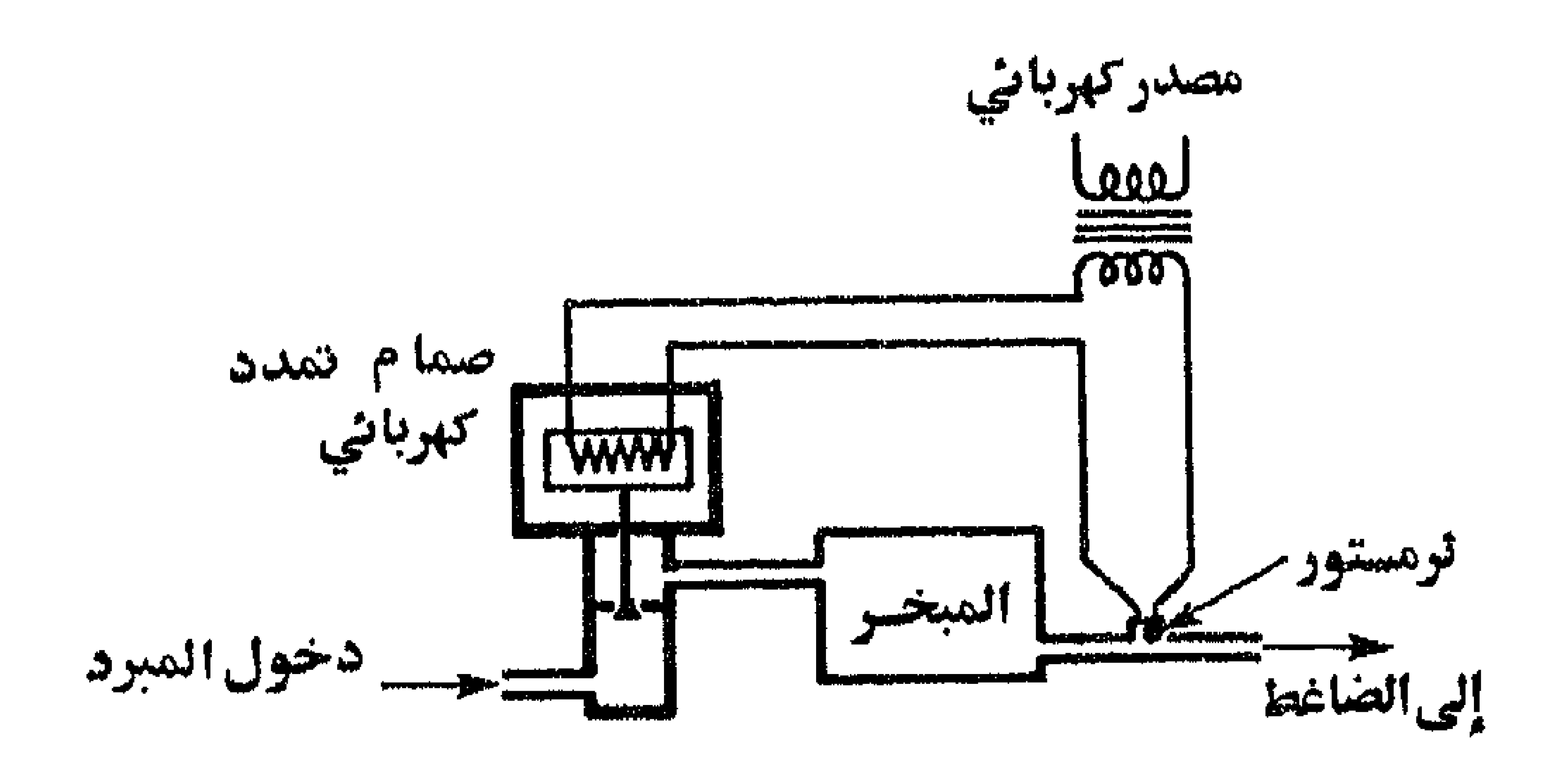
$$= 7.36 \times 10^{-6}\ m^2 = 7.36\ mm^2$$

أي بقطر قدره ٣.٠٦ مم .

٨.١١ صمام التمدد الكهربائي

انتشر حديثاً في صناعة التبريد صمامات تمدد تعرف بصمامات التمدد الكهربائية أو الإلكترونية . تعمل هذه الصمامات على تنظيم سريان المبرد مع اختلاف حمل التبريد ، كما تعمل أيضاً على المحافظة على قدر محدد لفرق درجات التحميص الفوقي عند الخروج من المبخر . وتختلف طريقة عمل هذه الصمامات من نوع إلى آخر . فبعض هذه الصمامات يعمل بموتورات يتم التحكم فيها حرارياً بدرجة حرارة بخار المبرد الخارج من المبخر ، والبعض الآخر يعمل بتغير مجال مغناطيسي ، وغيرها من الأنواع الأخرى .

ويبين شكل ٨.١٧ واحداً من صمامات التمدد الكهربائي التي تستخدم عنصراً حرارياً يعرف بالثرمستور ، وهو عبارة عن مقاومة كهربائية تتغير قيمتها بتغير درجة حرارتها (أي درجة الحرارة المحيطة بها) . ويوضع الثرمستور في خط السحب الخارج من المبخر كما هو موضح بالشكل . وتنخفض مقاومة الثرمستور بارتفاع فرق درجات التحميص الفوقي لبخار المبرد الخارج من المبخر . وبانخفاض مقاومة الثرمستور يزيد



شكل ٨.١٧ رسم تخطيطي لصمام تمدد كهربائي .

التيار الكهربائي المار به ، فيتحرك قلب الصمام في اتجاه الفتح لتوسعة مسار المبرد ، فيزيد معدل سريانه ، وبالتالي ينخفض مقدار فرق درجات التحميص الفوقي عند خروج المبخر إلى القيمة المحددة بالصمام . ويغلق صمام التمدد تلقائياً بمجرد إيقاف الضاغط .

ويمتاز صمام التمدد الكهربائي/الإلكتروني بعدم حاجته لمعادلة خارجية لضغط المبخر . ويمكن استخدام هذا الصمام - بالإضافة لاستخدامه في التحكم بفرق درجات التحميص الفوقي - لحد الضغط الأعلى والضغط الأدنى لتشغيل المبخر .

٨.١٢ الأنبوب الشعري

يستخدم الأنبوب الشعري كصمام تمدد لخفض ضغط المبرد من المكثف إلى المبخر . يعمل الأنبوب الشعري مع المبخرات المغمورة عادة . وهو عبارة عن أنبوب صغير القطر ، وإن كان الاسم غير صحيح حيث أن قطر الأنبوب لا يكون صغيراً إلى الدرجة التي يظهر فيها تأثير الخاصية الشعرية للأنابيب .

بفرض أنبوب بقطر d وطول L ، للعمل بفرق ضغط ΔP بين طرفي الأنبوب ، يحسب معدل سريان المبرد خلال الأنبوب من قوانين سريان الموائع كما يلي [جاهين وآخرون ١٩٨٥ ، والآشراي ١٩٨٥]

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\rho \Delta P}{f} \cdot \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{d^5}{L}} \tag{8.8}$$

حيث ρ هي الكثافة المتوسطة لسريان المبرد ، و f هي معامل احتكاك السريان في الأنبوب. ويحسب معامل الاحتكاك f من خريطة مودي [جاهين وآخرون ١٩٨٥، والآشراي ١٩٨٥] ، أو من العلاقة الآتية بفرض سريان مضطرب داخل أنبوب أملس السطح [الآشراي ١٩٨٥]

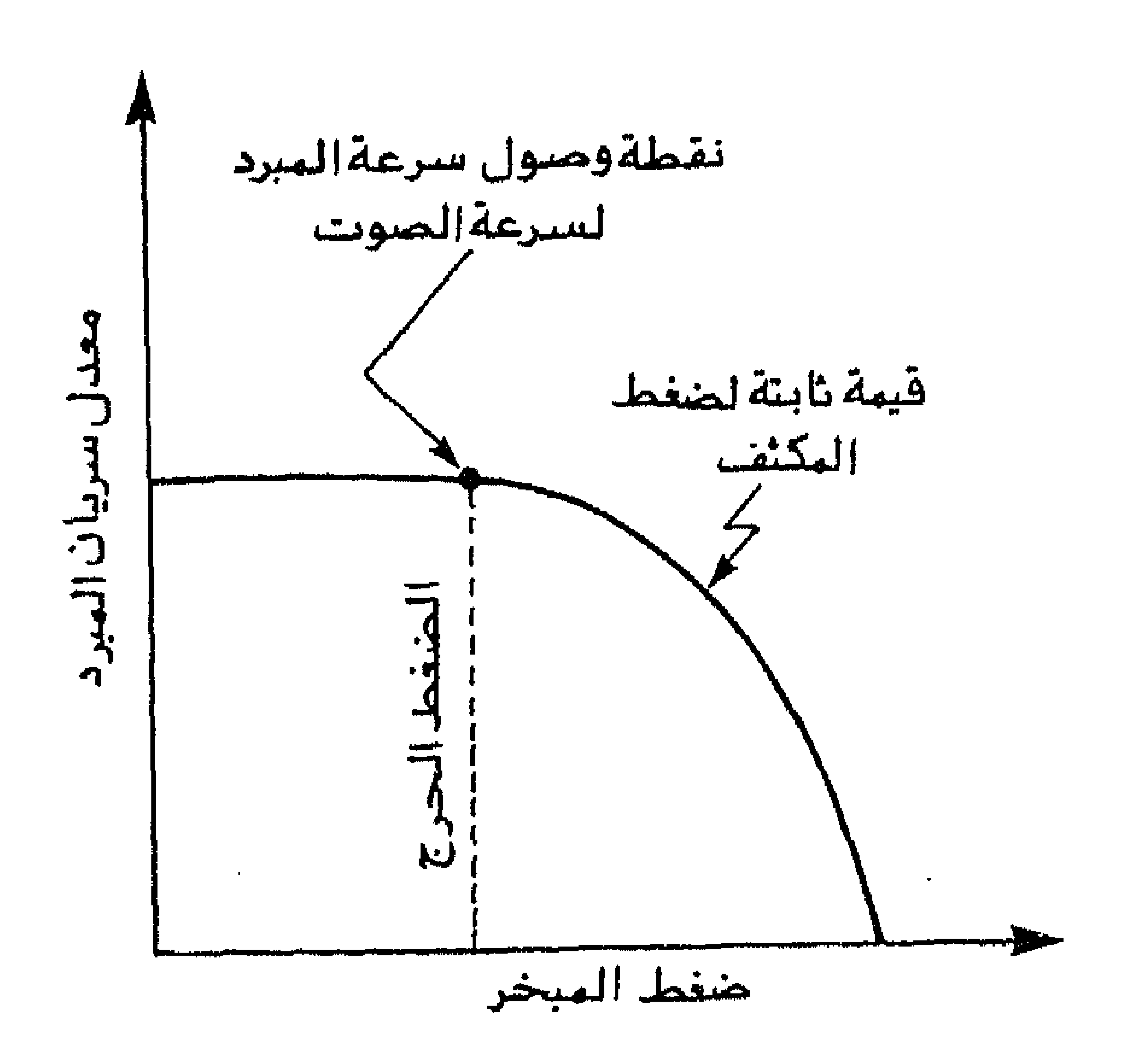
$$f = \frac{0.316}{Re^{\,0.25}} \tag{8.9}$$

ويتطلب تصميم الأنبوب الشعري اختيار طوله L وقطره d اللتين تسببان خفض الضغط من ضغط المكثف إلى ضغط المبخر ، وتعطيان سرياناً $\dot{m}$ يساوي سريان المبرد المطلوب بسعة تبريد Q_E ، أي أن

$$\dot{m} = \frac{Q_E}{h_1 - h_4} \tag{8.10}$$

حيث h_1 و h_2 هما أنثالبي المبرد عند خروج ودخول المبخر ، على التوالي . ونظراً لتغير كثافة المبرد ρ خلال طول الأنبوب ، يقسم فرق الضغط بين المكثف والمبخر إلى عدة أجزاء ΔP_1 ، ΔP_2 ، . . . الخ ، حيث يناظر كل جزء من فقد الضغط ١ ° م ، ثم يحسب طول الأنبوب لكل جزء بمفرده . يحسب لكل طول ΔL_i ، يناظر فقد الضغط ΔP_i ، حالة المبرد عند الخروج من هذا الجزء وهي أيضاً حالة دخول المبرد إلى الجزء التالي من الأنبوب . وتستخدم الكثافة المتوسطة خلال أي جزء من الأنبوب في حسابات طول هذا الجزء .

ومن المتغيرات التي يجب على المصمم مراعاتها عند حساب طول الأنبوب الشعري بالخطوات السابقة ، سرعة المبرد داخل الأنبوب . فمن معادلة ٨.٨ يزيد معدل سريان المبرد خلال الأنبوب بزيادة فرق الضغط بين طرفي الأنبوب . ويعني هذا أيضاً زيادة سرعة السريان داخل الأنبوب بانخفاض ضغط المبخر ، مع ثبات ضغط المكثف . وعليه يعرف الضغط الحرج للمبخر بأنه الضغط الذي يجعل سرعة المبرد داخل الأنبوب الشعري مساوية لسرعة الصوت . فإذا انخفض ضغط المبخر عن هذا الضغط الحرج ظلت سرعة المبرد مساوية لسرعة الصوت ، وبالتالي يبقى معدل السريان ثابتاً داخل الأنبوب مهما قل ضغط المبخر عن قيمة الضغط الحرج ، كما هو موضح بشكل ٨.١٨ . ويُعْرَفُ السريان عندئذ بالسريان المختنق (Choked flow) .

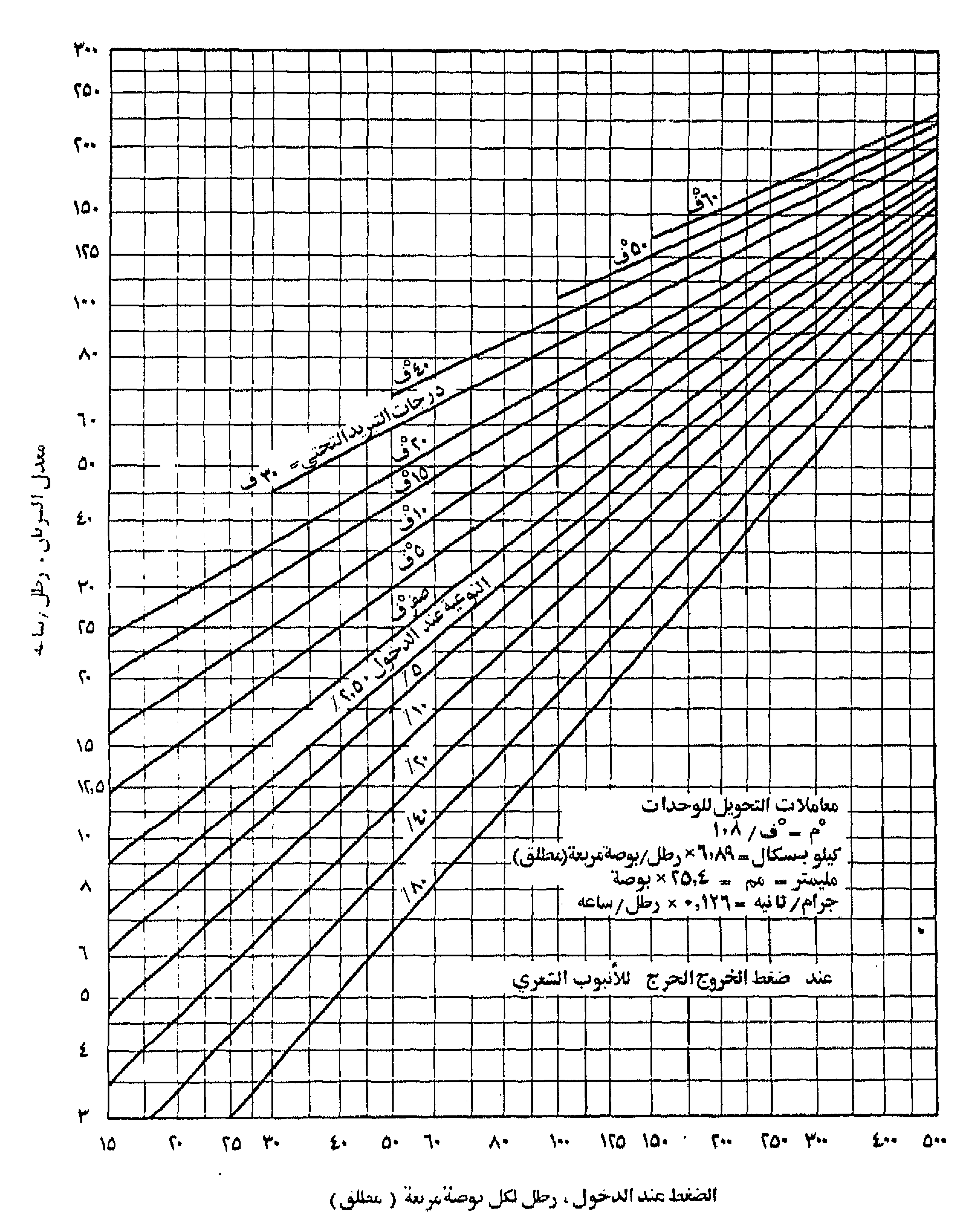


شكل ٨.١٨ التغير النمطي لمعدل سريان المبرد في أنبوب شعري مع ضغط المبخر ، عند ثبات ضغط المكثف .

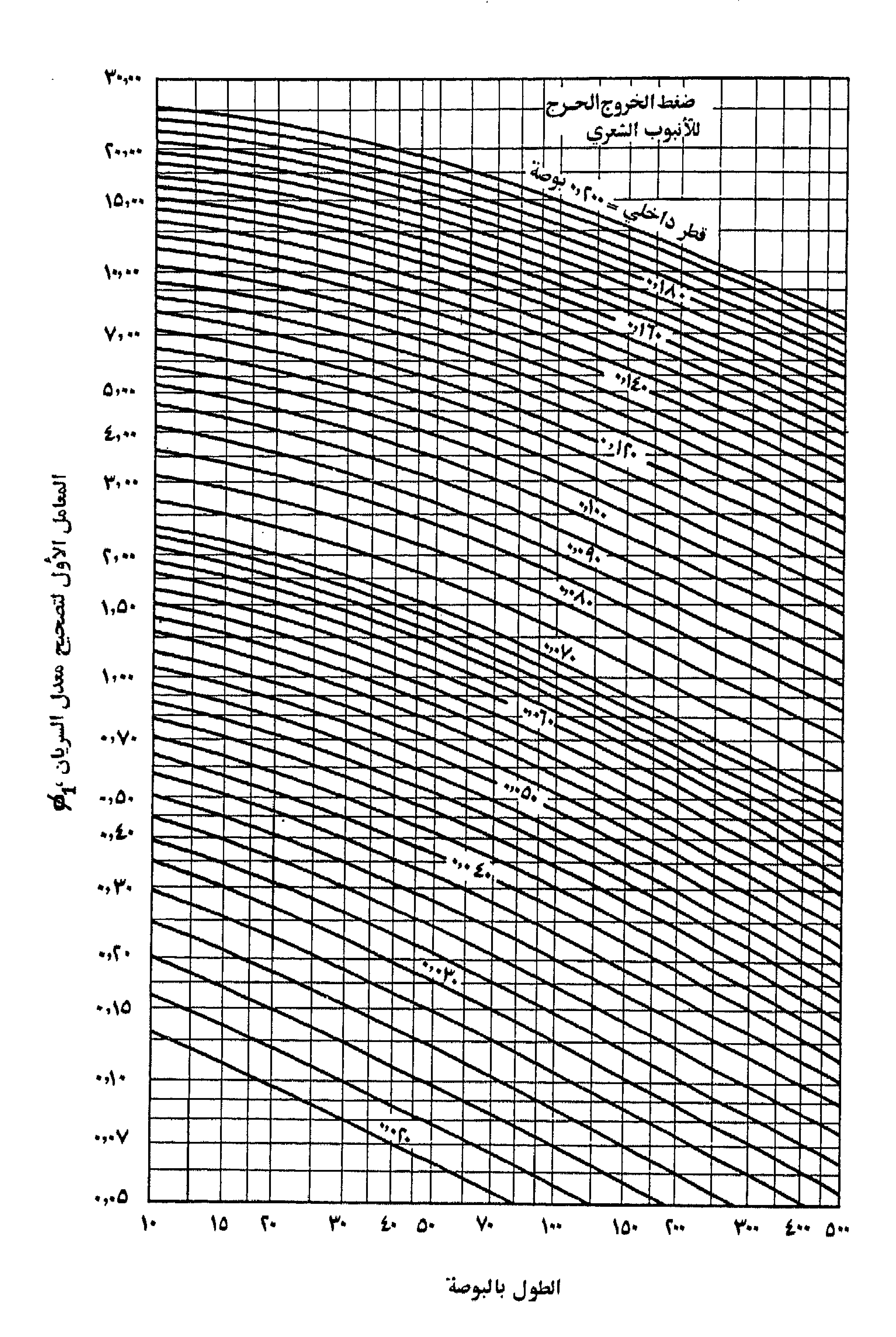
لاحظنا في الجزء السابق مدى الجهد والوقت اللازم لتصميم الأنبوب الشعري باستخدام الطريقة السابقة . وتسهيلاً لخطوات التصميم قام هوبكنز (١٩٥٠) ثم هوايتسل (ابريل ١٩٧٥ و سبتمبر ١٩٧٥) بوضع خرائط لتصميم الأنابيب الشعرية المستخدمة في نظم التبريد . وتوضح الأشكال ٨.١٩ إلى ٨.٢٢ الخرائط المستخدمة لهذا الغرض لمبردي ١٢ و ٢٢ [الآشراي ١٩٨٣ أو ١٩٨٨] . ويلاحظ استخدام هذه الخرائط لوحدات النظام الإنجليزي بدلاً من وحدات النظام الدولي ، مع وجود معاملات التحويل بين هذين النظامين بشكلي ٨.١٩ و ٨.٢١ . وتتلخص خطوات تصميم الأنبوب الشعري في الآتي :

أ) حدد شروط الدخول والخروج للأنبوب ، وكذلك معدل سريان المبرد خلال الأنبوب تبعاً لنظام التبريد الذي يعمل به الأنبوب .

ب) افرض أنبوب قياسي طوله ٨٠ بوصة وقطره الداخلي ٠.٠٦٤ بوصة ، ثم احسب معدل السريان m' خلال هذا الأنبوب بدلالة حالة دخول المبرد إلى الأنبوب من شكل ٨.١٩.



شكل ٨.١٩ منحنيات أداء أنبوب شعري قياسي (قطر داخلي قدره ٠.٠٦٤ بوصة وطول قدره ٨٠ بوصة) تصل بين المكثف ومبخر عند الضغط الحرج للخروج للأنبوب باستخدام مبردي ١٢ و ٢٢ [الأشراي ١٩٨٣].



شكل ٢ . ٨ خريطة المعامل الأول ϕ_1 لتصحيح معدل السريان بأنبوب شعري لمبردي ١٢ و ٢٢ [الأشراي ١٩٨٣] .

جـ) عين معامل التصحيح الأول ϕ_1 من شكل ٨.٢٠ بعد استبدال الأنبوب القياسي بأنبوب آخر معروف الطول والقطر .

د) عين قيمة الضغط الحرج للأنبوب الذي تم اختياره بالخطوة جـ . ويستخدم شكل ٨.٢١ لهذا الغرض . حدد قيمة ضغط دخول الأنبوب على المحور الأفقي بالشكل ، ثم اتجه رأسياً إلى الخط المناظر لحالة دخول المبرد إلى الأنبوب . عند نقطة التقاطع اتجه أفقياً حتى الخط المناظر لنسبة الطول إلى ١٢٥. القطر = ١ ، ثم اتجه رأسياً إلى القيمة الفعلية لنسبة الطول إلى ١٢٥. القطر . من نقطة التقاطع اتجه أفقياً مره أخرى إلى المحور الرأسي لقراءة قيمة الضغط الحرج لخروج الأنبوب .

هـ) احسب قيمة المعامل ψ المعرف بشكل ٨.٢٢ مع ملاحظة أخذ قيمة ψ مساوية صفراً إذا قل ضغط المبخر عن الضغط الحرج .

و) من شكل ٨.٢٢ احسب قيمة معامل التصحيح الثاني ϕ_2 .

ز) احسب معدل سريان المبرد خلال الأنبوب الذي اختير في الخطوة جـ من العلاقة الآتية

$$\dot{m}'' = \phi_1 \, \phi_2 \, \dot{m}' \quad (8.11)$$

ح) قارن القيمة $\dot{m}''$ بالقيمة $\dot{m}$ (بالخطوة أ) التي يحتاجها النظام .

ط) غير طول أو قطر الأنبوب بالخطوة جـ حتى تتساوي قيمتا $\dot{m}''$ و $\dot{m}$.

ويوضح المثال التالي استخدام الخطوات السابقة لتصميم أنبوب شعري لأحد نظم التبريد.

مثال ٨.٧

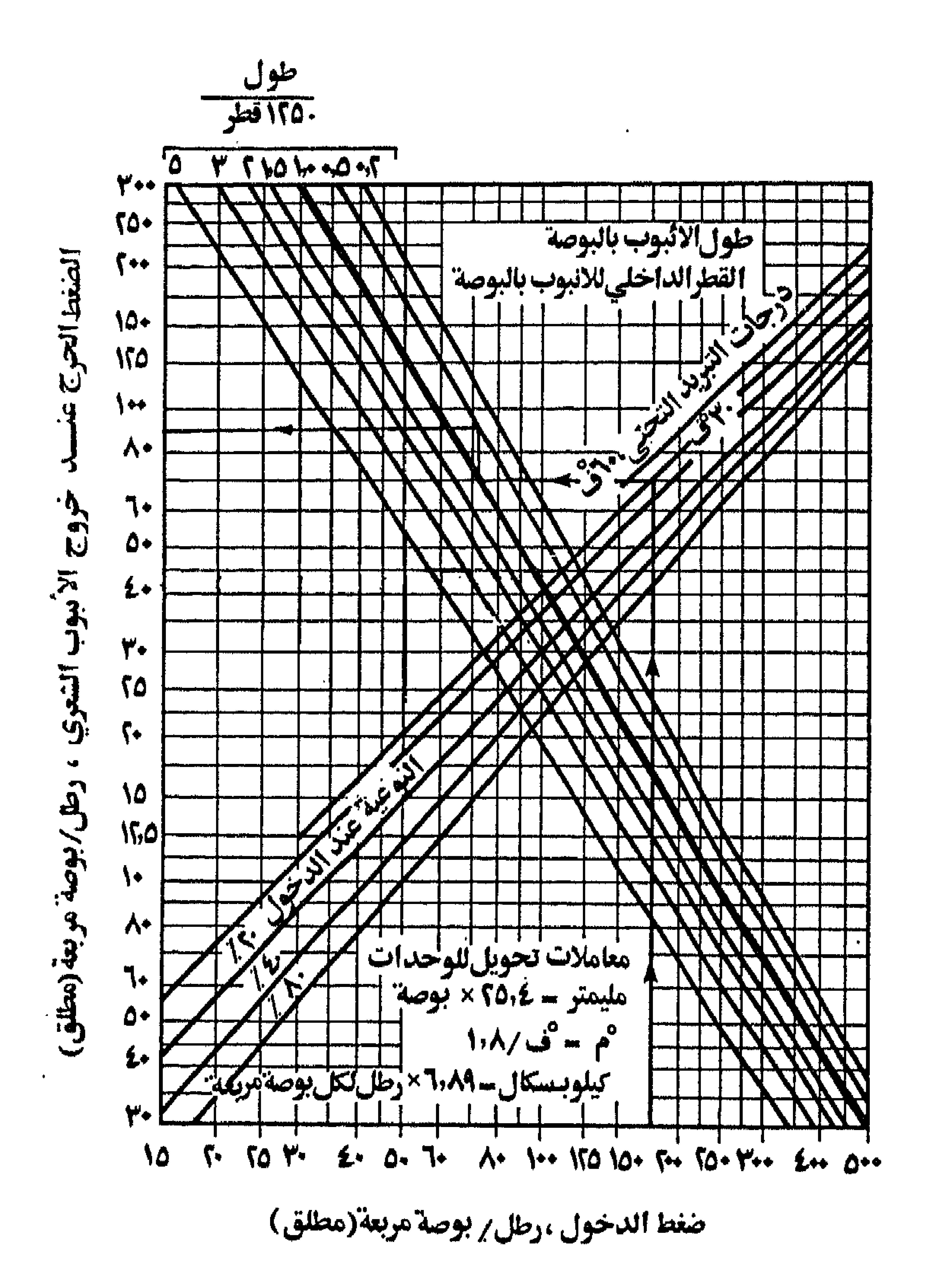
يعمل نظام تبريد بمبرد ١٢ بين درجة حرارة مكثف قدرها ٥٢ °م ودرجة حرارة مبخر قدرها ٤ °م ، بسعة تبريد قدرها ٧ كيلووات . المطلوب اختيار طول وقطر أنبوب شعري يعمل كصمام تمدد بهذا النظام ، بفرض أن سائل المبرد يدخل إلى الأنبوب بفرق درجات تبريد تحتي قدره ١٧ °م ، وبفرض حالة التشبع عند خروج المبخر .

الحل

من جدول خواص مبرد ١٢ بملحق أ ، ومن ملحق ب نجد الآتي

ضغط المكثف (ضغط دخول الأنبوب) = ٦ . ١٢٧٣ كيلوبسكال = ٨ . ١٨٤ رطل/بوصة[٢]

ضغط المبخر (ضغط خروج الأنبوب) = ٥ . ٣٥١ كيلوبسكال = ٥١ رطل/بوصة[٢]



شكل ٢١ . ٨ خريطة الضغط الحرج عند خروج الأنبوب الشعري لمبردي ١٢ و ٢٢ [الأشراي ١٩٨٣] .

فرق درجات التبريد التحتي = ١٧ ° م = ٦ , ٣٠ ° ف

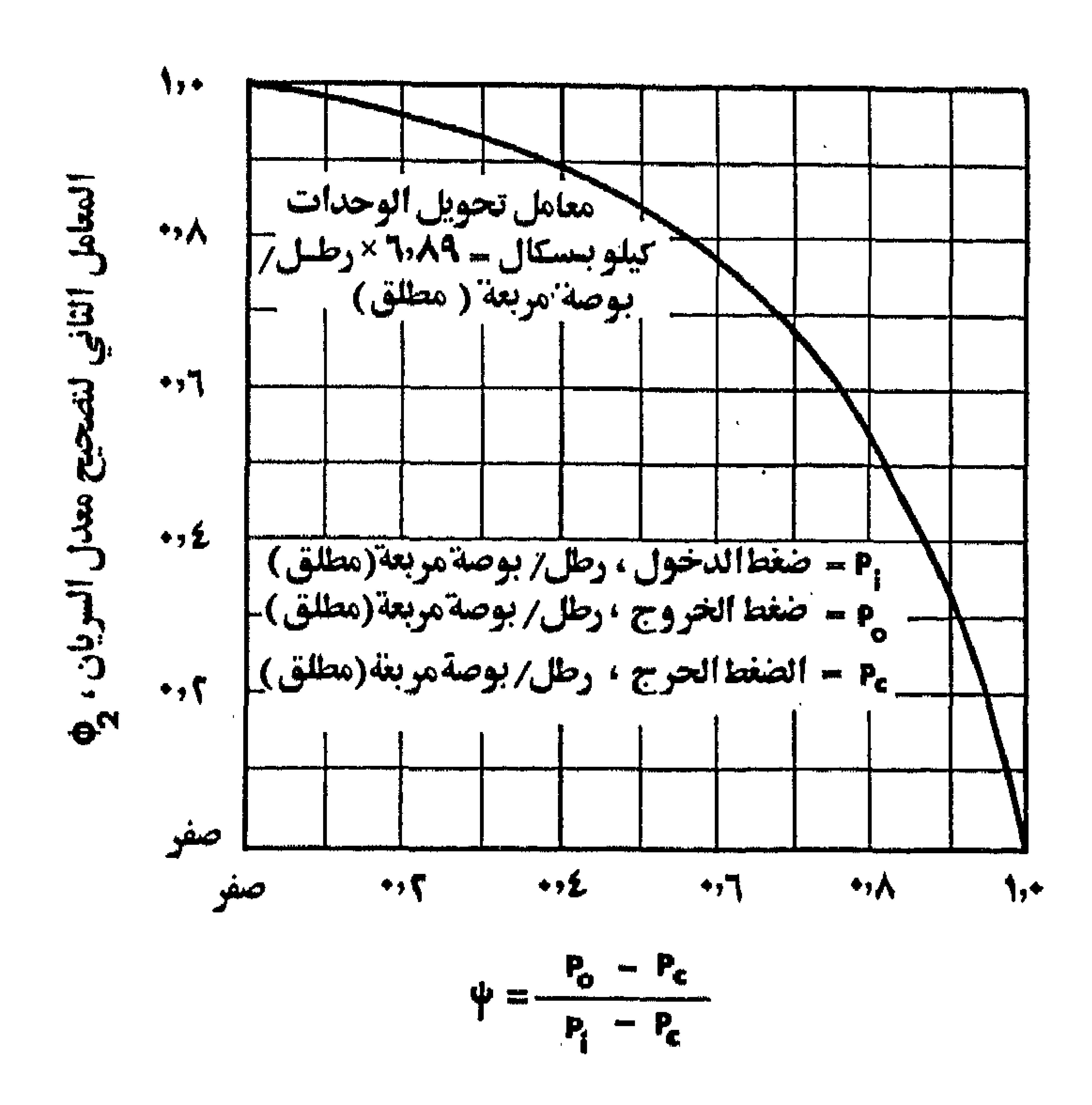
أنثالبي المبرد عند دخول الأنبوب = ٢ , ٢٣٤ كيلوجول/كجم

أنثالبي المبرد عند خروج الأنبوب = ٢ , ٣٥٤ كيلوجول/كجم

من المعلومات السابقة يُحْسَب معدل سريان المبرد بالنظام كما يلي

$$\dot{m} = \frac{7}{354.2 - 234.2} = 0.0583 \quad \text{kg/s} \quad = 462 \quad \text{lb/hr}$$

من شكل ٨,١٩ نحسب قيمة $\dot{m}'$ عند استعمال أنبوب قياسي ، إذا كان ضغط المبخر هو الضغط الحرج . من الشكل نجد أن $\dot{m}'$ = ١١٥ رطل/ساعة . نفرض الآن أنبوب بقطر ٠,١٠ بوصة (٥٤ , ٢ مم) وطول ١٠٠ بوصة ، ومن شكل ٨,٢٠ نجد أن ϕ_1 = ٢,٧٠ . من شكل ٨,٢١ نحسب الضغط الحرج لهذا الأنبوب بدلالة حالة دخول المبرد ، ومن الشكل نجد أن



شكل ٨,٢٢ خريطة المعامل الثاني ϕ_2 لتصحيح معدل السريان بالأنبوب الشعري لمبردي ١٢ و ٢٢[الأشراي ١٩٨٣].

جدول ٨.٣ ملخص حسابات مثال ٨.٧ .

$\dot{m}'$ رطل/ساعة	القطر بوصة	الطول بوصة	ϕ_1	الطول / ١٢٥٫القطر	الضغط الحرج كيلوبسكال	ψ	ϕ_2	$\dot{m}''$ رطل/ساعة
١١٥	٠.٠١٠	١٠٠	٢.٧٠	٠.٠٨٠	٨٥	٠.٠٠	١.٠٠	٣١٠.٥
	٠.٠١١	٦٢	٤.٠٠	٠.٠٤٥	٩٠	٠.٠٠	١.٠٠	٤٦٠.٠٠

قيمة الضغط الحرج = ٨٥ كيلوبسكال . وحيث أن هذا الضغط أكبر من ضغط المبخر فإن قيمة ψ تصبح صفراً . ومن شكل ٨.٢٢ نجد أن قيمة $\phi_2 = 1$. نحسب الآن قيمة $\dot{m}''$ من معادلة ٨.١١ كما يلي

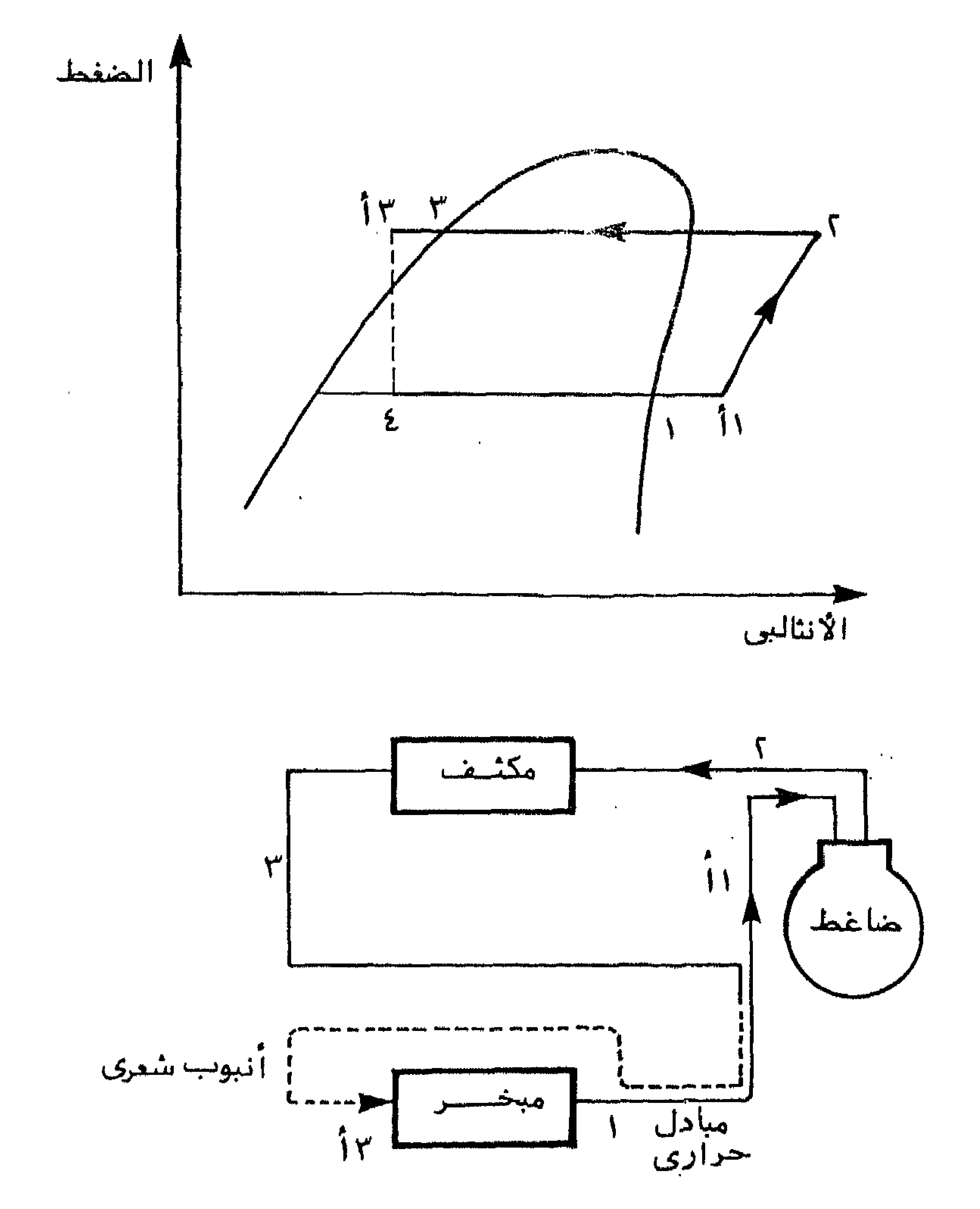
$$\dot{m}'' = 1.0 \times 2.70 \times 115 = 310.5 \quad \text{lb/hr}$$

وهي بالتأكيد أقل من القيمة المطلوبة لنظام التبريد وقدرها ٤٦٢ رطل/ساعة . تُعدّل قيمة قطر الأنبوب الشعري و/أو طوله للحصول على معدل سريان قدره ٤٦٢ رطل/ساعة . ويبين جدول ٨.٣ ملخص الحسابات .

٨.١٣ استخدام الأنبوب الشعري كمبادل حراري

بانخفاض الضغط أثناء سريان المبرد داخل الأنبوب الشعري تتغير حالة المبرد حتى يصبح داخل منطقة التشبع . ويعني هذا تبخر جزء منه ، أي وجود بعض البخار مختلط بسائل المبرد . ويعمل هذا البخار على إعاقة السريان خلال الأنبوب ، لذا يفضل أن تكون نسبة هذا البخار إلى معدل السريان أقل ما يمكن ، ويمكن تحقيق هذا الهدف بزيادة فرق درجات التبريد التحتي لسائل المبرد الداخل إلى الأنبوب الشعري .

ولقد وجد مصنعو نظم التبريد المستخدمة لأنابيب شعرية ، أن استعمال سطح الأنبوب كمبادل حراري يؤدي على زيادة فرق درجات التبريد التحتي لسائل المبرد الداخل إلى الأنبوب . ويتم هذا كما يلي . يوضع جزء من الأنبوب الشعري بحيث يلامس سطحه الخارجي السطح الخارجي لخط السحب ، ويكون اتجاه سريان المبرد في الأنبوب في اتجاه معاكس لاتجاه سريان المبرد بخط السحب (كما هو موضح بشكل ٨.٢٣) . يعزل هذا الجزء



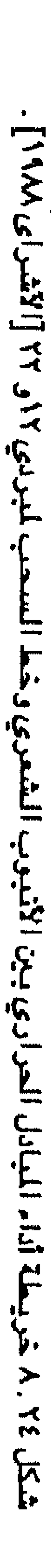
شكل ٨.٢٣ استخدام جزء من الأنبوب الشعري كمبادل حراري للحصول على فرق درجات تبريد تحتي بسائل المبرد .

حرارياً عن الجو المحيط ليكون معظم التبادل الحراري بين بخار المبرد بخط السحب والمبرد بالأنبوب فقط . وتنتقل الحرارة عندئذ من المبرد داخل الأنبوب إلى البخار البارد نسبياً بخط السحب . ومن المميزات الأخرى لاستخدام الأنبوب الشعري كمبادل حراري - بالإضافة إلى خفض نسبة البخر بالمبرد أثناء سريانه داخل الأنبوب - زيادة التأثير التبريدي بالمبخر والحصول على فرق درجات تحميص فوقي بخط السحب (بعد الخروج من المبادل الحراري) مما يحمي الضاغط من احتمال طفح سائل المبرد إليه (انظر شكل ٨.٢٣) .

يعتمد مقدار التبريد التحتي الناتج في المبادل الحراري السابق ذكره على : قطر خط السحب ، وطول جزئه المستخدم للتبادل الحراري مع الأنبوب الشعري ، ودرجة حرارة سائل المبرد عند دخول الأنبوب ، ودرجة حرارة بخار المبرد الخارج من المبخر ، ومعدل سريان المبرد في نظام التبريد ، ونوع المبرد . ويبين شكل ٨.٢٤ خريطة أداء المبادل الحراري بدلالة المتغيرات السابقة لمبردي ١٢ و ٢٢ [الأشراي ١٩٨٨] . والخريطة كما هو موضح تستخدم وحدات النظام الإنجليزي بدلاً من وحدات النظام الدولي ، لذا يجب استخدام ملحق ب للتحويل بين وحدات النظامين . ويبين المثال التالي طريقة استخدام الخريطة لحساب مقدار التبريد التحتي الذي يعطيه المبادل الحراري .

مثال ٨.٨

احسب مقدار فرق درجات التبريد التحتي الذي يعطيه مبادل حراري بين أنبوب شعري وخط سحب قطره الداخلي ١٠.٩ مم وطوله ٣٠ سم . يسري مبرد ١٢ في نظام التبريد تحت الدراسة بمعدل قدره ٩٠.٧ كجم/ساعة ، ويخرج بخار مبرد ١٢ من المبخر عند درجة حرارة تقل عن درجة حرارة دخول سائل المبرد إلى الأنبوب الشعري بمقدار ٣٣ ^{o} م .
احسب مقدار فرق درجات التبريد التحتي إذا زاد طول خط السحب إلى ٦٠ سم .



شكل ٨.٢٤ خريطة أداء المبادل الحراري بين الأنبوب الشعري وخط السحب لمبردي ١٢و ٢٢ [الأشراى ١٩٨٨].

الحل

لاستخدام شكل ٨.٢٤ ، يلزم أولاً التحويل إلى وحدات النظام البريطاني . من ملحق ب نجد أن القطر الداخلي لخط السحب = ٠.٤٣ بوصة ، وطوله ٠.٩٨ قدم ، ويسري المبرد بمعدل قدره ١٩٩.٥ رطل/ساعة . ويخرج بخار مبرد ١٢ من المبخر بدرجة حرارة تقل عن درجة حرارة دخول سائل المبرد إلى الأنبوب الشعري بمقدار ٦٠ ° ف .

في شكل ٨.٢٤ نبدء العمل كما يلي . يحدد قطر خط السحب على المحور الأفقى ثم نتجه رأسياً إلى منحنى مبرد ١٢ . عند نقطة التقاطع نتجه أفقياً إلى الخط الذي له معدل سريان مبرد قدره ١٩٩.٥ رطل/ساعة ، ومن نقطة التقاطع نتجه لأسفل إلى منحنى طول خط السحب الذي قدره ٠.٩٨ قدم . من نقطة التقاطع نتجه أفقياً إلى الخط ذي ٦٠ ° ف فرق درجات حرارة بين دخول سائل المبرد وخروج بخار المبرد . عند نقطة التقاطع نتجه رأسياً إلى أسفل حيث يعطي المحور الأفقي ٤ ° ف (٢.٢ ° م) فرق درجات تبريد تحتي .

إذا زاد طول خط السحب إلى ٦٠ سم (٢ قدم) يعطي الشكل ١٤ ° ف (٧.٨ ° م) فرق درجات تبريد تحتي .

ملحق أ

جداول وخرائط المبردات

يشمل الملحق جداول خواص السائل المشبع والبخار المشبع ، وكذلك خرائط الضغط - الأنثالبي للمبردات الآتية [الآشراي ١٩٨٩]

مبرد ١١

مبرد ١٢

مبرد ٢٢

مبرد ٧١٧ (الأمونيا) .

كما يشمل الملحق أيضاً خريطة السيكرومتري للهواء الرطب عند الضغط الجوي .

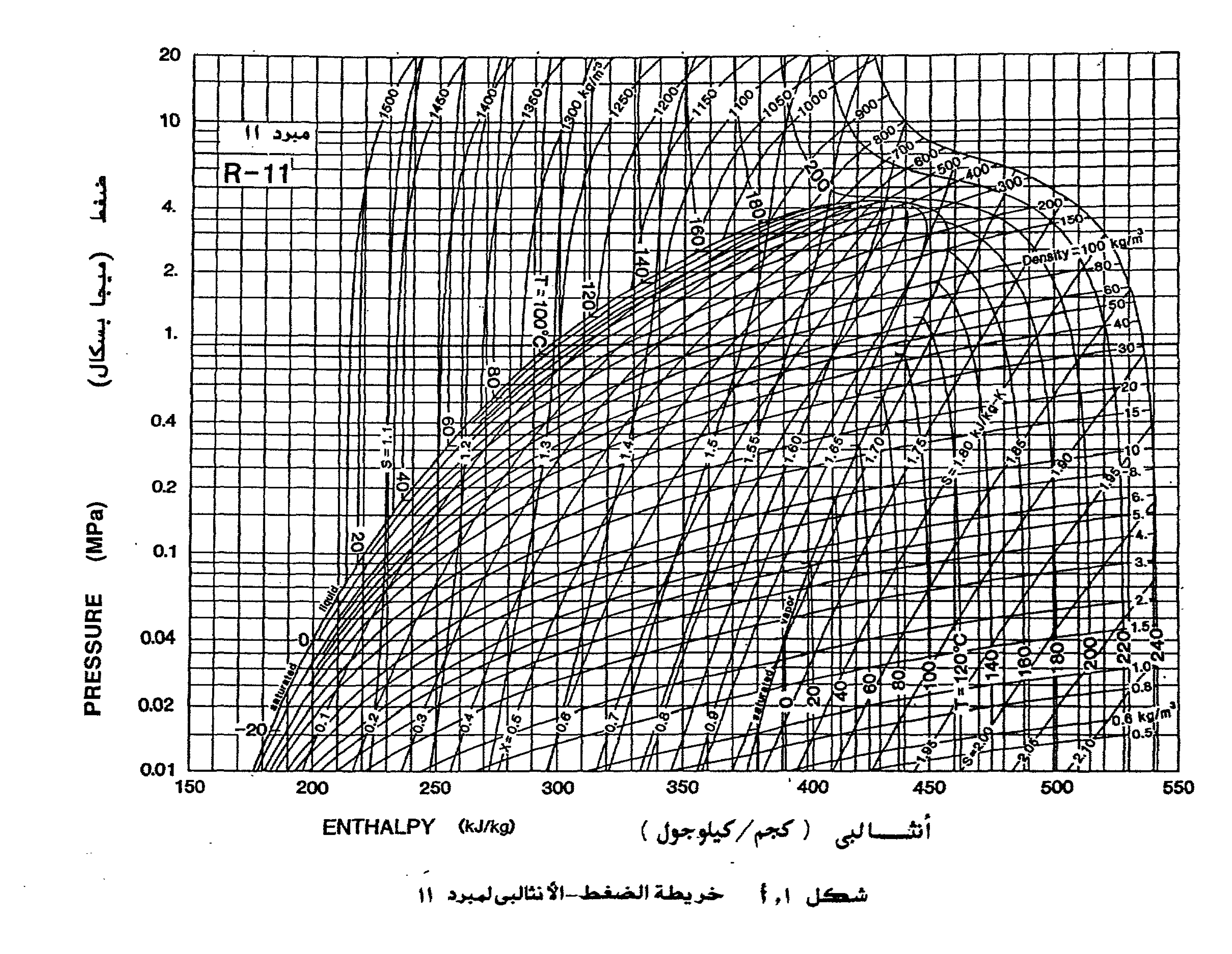
جدول ١,١أ خواص السائل المشبع والبخار المشبع لمبرد ١١ (..... يتبع)

درجة الحرارة	الضغط	حجم البخار	كثافة السائل	انثالبي		انتروبي	
				سائل	بخار	سائل	بخار
٥ م	ميجابسكال	م³/كجم	كجم/م³	كيلوجول/كجم	كيلوجول/كجم	كيلوجول/كجم ك	كيلوجول/كجم ك
−٧٠	٠٫٠٠٠٥٦٨	٢١٫٦٤٥	١٦٨٧٫٣	١٥٣٫٥٨	٣٥٥٫٥٣	٠٫٨٠٨٦٢	١٫٨٠٦٥
−٦٥	٠٫٠٠٠٨٦١	١٤٫٦١٦	١٦٧٦٫١	١٥٤٫٦٠	٣٥٧٫٩٠	٠٫٨١٣٥٦	١٫٧٩٢٨
−٦٠	٠٫٠٠١٢٧٧	١٠٫٠٨٨	١٦٦٤٫٩	١٥٦٫٣١	٣٦٠٫٣٠	٠٫٨٢١٦٩	١٫٧٨٠٤
−٥٥	٠٫٠٠١٨٥٥	٧٫١٠٥٥	١٦٥٣٫٩	١٥٨٫٥٨	٣٦٢٫٧٣	٠٫٨٣٢٢٢	١٫٧٦٩١
−٥٠	٠٫٠٠٢٦٤٣	٥٫٠٩٩٧	١٦٤٣٫٠	١٦١٫٣٠	٣٦٥٫١٨	٠٫٨٤٤٥٤	١٫٧٥٨٨
−٤٥	٠٫٠٠٣٦٩٨	٣٫٧٢٤٤	١٦٣٢٫٢	١٦٤٫٣٨	٣٦٧٫٦٥	٠٫٨٥٨١٦	١٫٧٤٩٥
−٤٠	٠٫٠٠٣٠٨٨	٢٫٧٦٤٢	١٦٢١٫٣	١٦٧٫٧٤	٣٧٠٫١٤	٠٫٨٧٢٧٣	١٫٧٤١١
−٣٥	٠٫٠٠٦٨٩٢	٢٫٠٨٢٦	١٦١٠٫٥	١٧١٫٣٣	٣٧٢٫٦٦	٠٫٨٨٧٩٦	١٫٧٣٣٤
−٣٠	٠٫٠٠٩٢٠٠	١٫٥٩١٠	١٥٩٩٫٧	١٧٥٫١٠	٣٧٥٫١٨	٠٫٩٠٣٦٣	١٫٧٢٦٥
−٢٥	٠٫٠١٢١١٧	١٫٢٣١٤	١٥٨٨٫٨	١٧٩٫٠٢	٣٧٧٫٧٣	٠٫٩١٩٥٨	١٫٧٢٠٣
−٢٠	٠٫٠١٥٧٥٦	٠٫٩٦٤٥٧	١٥٧٧٫٩	١٨٣٫٠٦	٣٨٠٫٢٨	٠٫٩٣٥٦٨	١٫٧١٤٧
−١٥	٠٫٠٢٠٢٤٧	٠٫٧٦٤١٢	١٥٦٧٫٠	١٨٧٫١٩	٣٨٢٫٨٥	٠٫٩٥١٨٤	١٫٧٠٩٧
−١٠	٠٫٠٢٥٧٣٠	٠٫٦١١٧٠	١٥٥٥٫٩	١٩١٫٤٠	٣٨٥٫٤٣	٠٫٩٦٧٩٨	١٫٧٠٥٣
−٥	٠٫٠٣٢٣٥٩	٠٫٤٩٤٥٠	١٥٤٤٫٩	١٩٥٫٦٨	٣٨٨٫٠١	٠٫٩٨٤٠٥	١٫٧٠١٣
٠	٠٫٠٤٠٣٠١	٠٫٤٠٣٤١	١٥٣٣٫٧	٢٠٠٫٠٠	٣٩٠٫٥٩	١٫٠٠٠٠	١٫٦٩٧٨
٢	٠٫٠٤٣٨٨٥	٠٫٣٧٢٧٦	١٥٢٩٫٢	٢٠١٫٧٤	٣٩١٫٦٣	١٫٠٠٦٣	١٫٦٩٦٥
٤	٠٫٠٤٧٧١٩	٠٫٣٤٤٨٩	١٥٢٤٫٧	٢٠٣٫٤٩	٣٩٢٫٦٧	١٫٠١٢٧	١٫٦٩٥٢
٦	٠٫٠٥١٨١٥	٠٫٣١٩٥٢	١٥٢٠٫١	٢٠٥٫٢٤	٣٩٣٫٧٠	١٫٠١٩٠	١٫٦٩٤١
٨	٠٫٠٥٦١٨٧	٠٫٢٩٦٣٩	١٥١٥٫٦	٢٠٧٫٠٠	٣٩٤٫٧٤	١٫٠٢٥٢	١٫٦٩٣٠
١٠	٠٫٠٦٠٨٤٧	٠٫٢٧٥٢٧	١٥١١٫٠	٢٠٨٫٧٧	٣٩٥٫٧٧	١٫٠٣١٥	١٫٦٩١٩
١٢	٠٫٠٦٥٨٠٨	٠٫٢٥٥٩٦	١٥٠٦٫٤	٢١٠٫٥٣	٣٩٦٫٨١	١٫٠٣٧٧	١٫٦٩٠٩
١٤	٠٫٠٧١٠٨٣	٠٫٢٣٨٢٨	١٥٠١٫٨	٢١٢٫٣١	٣٩٧٫٨٤	١٫٠٤٣٩	١٫٦٩٠٠
١٦	٠٫٠٧٦٦٨٦	٠٫٢٢٢٠٦	١٤٩٧٫٢	٢١٤٫٠٨	٣٩٨٫٨٨	١٫٠٥٠٠	١٫٦٨٩١
١٨	٠٫٠٨٢٦٣١	٠٫٢٠٧١٨	١٤٩٢٫٦	٢١٥٫٨٧	٣٩٩٫٩١	١٫٠٥٦١	١٫٦٨٨٣
٢٠	٠٫٠٨٨٩٣٣	٠٫١٩٣٥١	١٤٨٧٫٩	٢١٧٫٦٥	٤٠٠٫٩٤	١٫٠٦٢٢	١٫٦٨٧٥
٢٢	٠٫٠٩٥٦٠٥	٠٫١٨٠٩٢	١٤٨٣٫٢	٢١٩٫٤٤	٤٠١٫٩٧	١٫٠٦٨٣	١٫٦٨٦٨
٢٣٫٦٣	٠٫١٠١٣٢٥	٠٫١٧١٤٠	١٤٧٩٫٤	٢٢٠٫٩٠	٤٠٢٫٨١	١٫٠٧٣٢	١٫٦٨٦٢
٢٤	٠٫١٠٢٦٦	٠٫١٦٩٣٢	١٤٧٨٫٥	٢٢١٫٢٣	٤٠٣٫٠٠	١٫٠٧٤٤	١٫٦٨٦١
٢٦	٠٫١١٠١٢	٠٫١٥٨٦٢	١٤٧٣٫٨	٢٢٣٫٠٣	٤٠٤٫٠٣	١٫٠٨٠٤	١٫٦٨٥٤
٢٨	٠٫١١٧٩٩	٠٫١٤٨٧٤	١٤٦٩٫٠	٢٢٤٫٨٣	٤٠٥٫٠٦	١٫٠٨٦٣	١٫٦٨٤٨
٣٠	٠٫١٢٦٣٠	٠٫١٣٩٦١	١٤٦٤٫٣	٢٢٦٫٦٣	٤٠٦٫٠٨	١٫٠٩٢٣	١٫٦٨٤٢
٣٢	٠٫١٣٥٠٥	٠٫١٣١١٥	١٤٥٩٫٥	٢٢٨٫٤٤	٤٠٧٫١٠	١٫٠٩٨٢	١٫٦٨٣٧
٣٤	٠٫١٤٤٢٦	٠٫١٢٣٣٢	١٤٥٤٫٦	٢٣٠٫٢٥	٤٠٨٫١٢	١٫١٠٤١	١٫٦٨٣٢
٣٦	٠٫١٥٣٩٥	٠٫١١٦٠٥	١٤٤٩٫٨	٢٣٢٫٠٦	٤٠٩٫١٤	١٫١١٠٠	١٫٦٨٢٨
٣٨	٠٫١٦٤١٣	٠٫١٠٩٣٠	١٤٤٤٫٩	٢٣٣٫٨٨	٤١٠٫١٦	١٫١١٥٨	١٫٦٨٢٣

جدول ١,أ ..... تابع

درجة الحرارة ٥ م	الضغط ميجابسكال	حجم البخار م٣/كجم	كثافة السائل كجم/م٣	أنثالبي: سائل كيلوجول/كجم	أنثالبي: بخار كيلوجول/كجم	أنتروبي: سائل كيلوجول/كجم ك	أنتروبي: بخار كيلوجول/كجم ك
٤٠	٠.١٧٤٨٣	٠.٠١٠٣٠٣	١٤٤٠.٠	٢٣٥.٧٠	٤١١.١٧	١.١٢١٦	١.٦٨١٩
٤٢	٠.١٨٦٠٥	٠.٠٠٩٧٢٠	١٤٣٥.١	٢٣٧.٥٢	٤١٢.١٨	١.١٢٧٤	١.٦٨١٦
٤٤	٠.١٩٧٨١	٠.٠٠٩١٧٦	١٤٣٠.١	٢٣٩.٣٥	٤١٣.١٩	١.١٣٣١	١.٦٨١٣
٤٦	٠.٢١٠١٤	٠.٠٠٨٦٧٠	١٤٢٥.١	٢٤١.١٨	٤١٤.١٩	١.١٣٨٩	١.٦٨١٠
٤٨	٠.٢٢٣٠٥	٠.٠٠٨١٩٧	١٤٢٠.١	٢٤٣.٠١	٤١٥.١٩	١.١٤٤٥	١.٦٨٠٧
٥٠	٠.٢٣٦٥٥	٠.٠٠٧٧٥٦	١٤١٥.٠	٢٤٤.٨٥	٤١٦.١٩	١.١٥٠٢	١.٦٨٠٤
٥٥	٠.٢٧٣٠٣	٠.٠٠٦٧٧٤	١٤٠٢.٣	٢٤٩.٤٥	٤١٨.٦٧	١.١٦٤٣	١.٦٧٩٩
٦٠	٠.٣١٣٦١	٠.٠٠٥٩٤٠	١٣٨٩.٣	٢٥٤.٠٨	٤٢١.١٢	١.١٧٨٢	١.٦٧٩٦
٦٥	٠.٣٥٨٦٠	٠.٠٠٥٢٢٨	١٣٧٦.١	٢٥٨.٧٣	٤٢٣.٥٤	١.١٩١٩	١.٦٧٩٣
٧٠	٠.٤٠٨٢٨	٠.٠٠٤٦١٨	١٣٦٢.٦	٢٦٣.٤١	٤٢٥.٩٣	١.٢٠٥٦	١.٦٧٩٢
٧٥	٠.٤٦٢٩٤	٠.٠٠٤٠٩٢	١٣٤٨.٩	٢٦٨.١١	٤٢٨.٢٨	١.٢١٩١	١.٦٧٩١
٨٠	٠.٥٢٢٨٩	٠.٠٠٣٦٣٧	١٣٣٤.٩	٢٧٢.٨٤	٤٣٠.٥٩	١.٢٣٢٤	١.٦٧٩١
٨٥	٠.٥٨٨٤٤	٠.٠٠٣٢٤١	١٣٢٠.٦	٢٧٧.٦١	٤٣٢.٨٦	١.٢٤٥٧	١.٦٧٩٢
٩٠	٠.٦٥٩٩١	٠.٠٠٢٨٩٦	١٣٠٦.٠	٢٨٢.٤١	٤٣٥.٠٨	١.٢٥٨٨	١.٦٧٩٢
٩٥	٠.٧٣٧٦٣	٠.٠٠٢٥٩٣	١٢٩١.١	٢٨٧.٢٤	٤٣٧.٢٥	١.٢٧١٩	١.٦٧٩٣
١٠٠	٠.٨٢١٩٢	٠.٠٠٢٣٢٧	١٢٧٥.٨	٢٩٢.١٢	٤٣٩.٣٦	١.٢٨٤٩	١.٦٧٩٥
١٠٥	٠.٩١٣١٣	٠.٠٠٢٠٩٢	١٢٦٠.٠	٢٩٧.٠٣	٤٤١.٤٠	١.٢٩٧٨	١.٦٧٩٥
١١٠	١.٠١١٦	٠.٠٠١٨٨٤	١٢٤٣.٩	٣٠٢.٠٠	٤٤٣.٣٨	١.٣١٠٦	١.٦٧٩٦
١١٥	١.١١٧٧	٠.٠٠١٦٩٩	١٢٢٧.٢	٣٠٧.٠١	٤٤٥.٢٨	١.٣٢٣٤	١.٦٧٩٦
١٢٠	١.٢٣١٨	٠.٠٠١٥٣٤	١٢١٠.٠	٣١٢.٠٨	٤٤٧.٠٩	١.٣٣٦١	١.٦٧٩٥
١٢٥	١.٣٥٤٢	٠.٠٠١٣٨٧	١١٩٢.٣	٣١٧.٢١	٤٤٨.٨٢	١.٣٤٨٨	١.٦٧٩٤
١٣٠	١.٤٨٥٥	٠.٠٠١٢٥٤	١١٧٣.٩	٣٢٢.٤٠	٤٥٠.٤٣	١.٣٦١٥	١.٦٧٩١
١٣٥	١.٦٢٥٩	٠.٠٠١١٣٥	١١٥٤.٨	٣٢٧.٦٧	٤٥١.٩٣	١.٣٧٤٢	١.٦٧٨٧
١٤٠	١.٧٧٥٩	٠.٠٠١٠٢٨	١١٣٤.٨	٣٣٣.٠٢	٤٥٣.٣٠	١.٣٨٦٩	١.٦٧٨١
١٤٥	١.٩٣٦٠	٠.٠٠٠٩٢٩٩	١١١٣.٩	٣٣٨.٤٦	٤٥٤.٥٣	١.٣٩٩٧	١.٦٧٧٢
١٥٠	٢.١٠٦٦	٠.٠٠٠٨٤١١	١٠٩٢.٠	٣٤٤.٠١	٤٥٥.٥٨	١.٤١٢٥	١.٦٧٦٢
١٥٥	٢.٢٨٨٢	٠.٠٠٠٧٥٩٩	١٠٦٨.٨	٣٤٩.٦٨	٤٥٦.٤٣	١.٤٢٥٤	١.٦٧٤٨
١٦٠	٢.٤٨١٢	٠.٠٠٠٦٨٥٥	١٠٤٤.١	٣٥٥.٥٠	٤٥٧.٠٦	١.٤٣٨٥	١.٦٧٣٠
١٦٥	٢.٦٨٦٣	٠.٠٠٠٦١٦٩	١٠١٧.٥	٣٦١.٤٨	٤٥٧.٤١	١.٤٥١٨	١.٦٧٠٧
١٧٠	٢.٩٠٣٩	٠.٠٠٠٥٥٣٣	٩٨٨.٦١	٣٦٧.٦٩	٤٥٧.٤٢	١.٤٦٥٤	١.٦٦٧٨
١٧٥	٣.١٣٤٥	٠.٠٠٠٤٩٣٧	٩٥٦.٥٥	٣٧٤.١٧	٤٥٦.٩٩	١.٤٧٩٤	١.٦٦٤٢
١٨٠	٣.٣٧٨٧	٠.٠٠٠٤٣٧٢	٩٢٠.٠٠	٣٨١.٠٦	٤٥٥.٩٨	١.٤٩٤١	١.٦٥٩٤
١٨٥	٣.٦٣٧١	٠.٠٠٠٣٨٢٣	٨٧٦.٢٨	٣٨٨.٥٦	٤٥٤.١١	١.٥٠٩٩	١.٦٥٣٠
١٩٠	٣.٩١٠٢	٠.٠٠٠٣٢٦٣	٨١٨.٤٠	٣٩٧.٢٨	٤٥٠.٧٢	١.٥٢٨١	١.٦٤٣٥
*١٩٨.٠	٤.٤١٠	٠.٠٠٠١٨٠	٥٥٧.٠	٤٢٦.٣	٤٢٦.٣	١.٥٨٩	١.٥٨٩

* النقطة الحرجة



شكل ١,أ خريطة الضغط-الأنثالبي لمبرد ١١

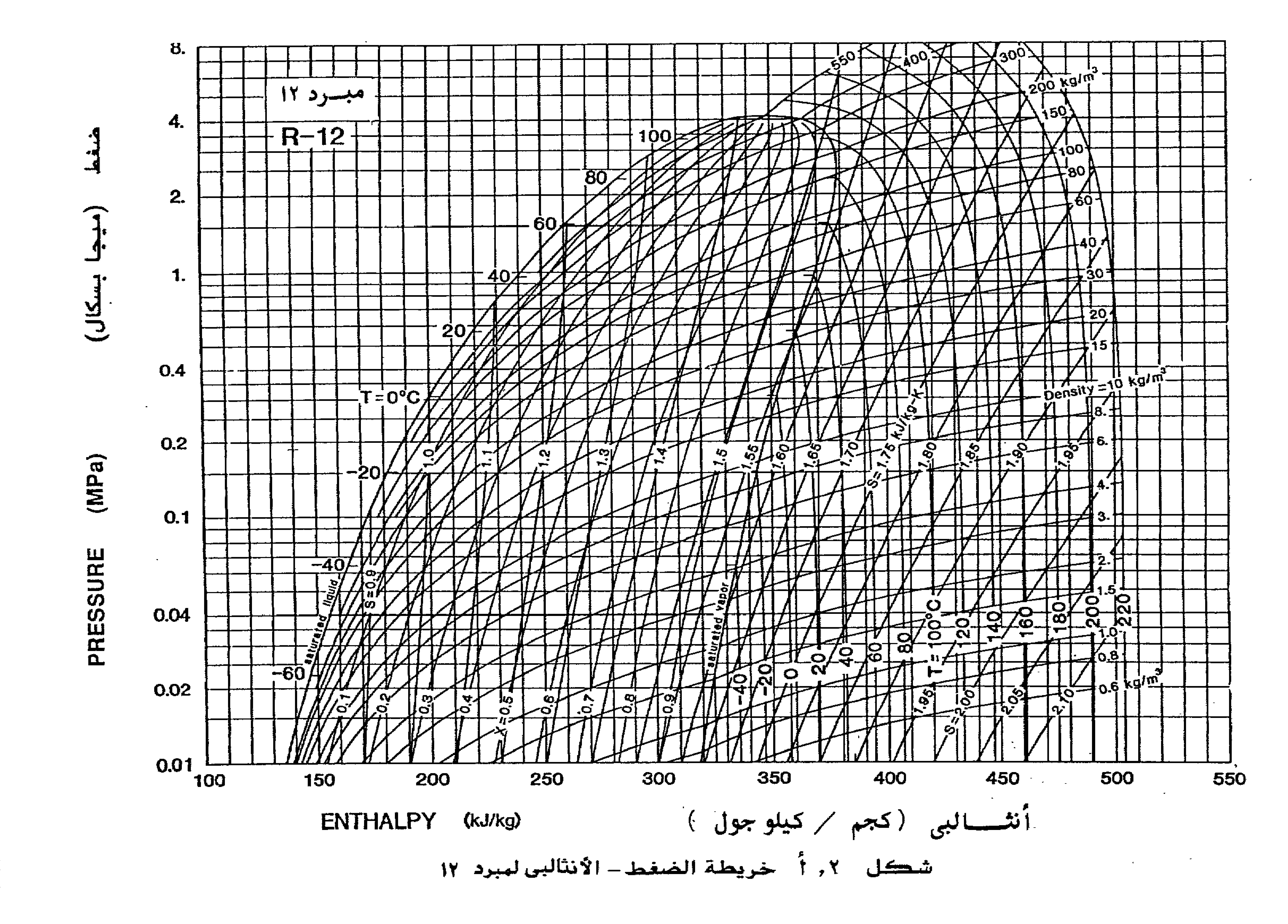
جدول ٢؛أ خواص السائل المشبع والبخار المشبع لمبرد ١٢ (..... يتبع)

درجة الحرارة	الضغط	حجم البخار	كثافة السائل	أنثالبي		أنتروبي	
				سائل	بخار	سائل	بخار
°م	ميجابسكال	$م^3$/كجم	كجم/$م^3$	كيلوجول/كجم	كيلوجول/كجم	كيلوجول/كجم ك	كيلوجول/كجم ك
−١٠٠	٠٫٠٠١١٧٤	١٠٫١٢٢	١٦٧٨٫٠	١١٢٫٦٩	٣٠٦٫٤٦	٠٫٦٠٤٤١	١٫٧٢٣٥
−٩٥	٠٫٠٠١٨٥١	٦٫٦٠٠٥	١٦٦٥٫٠	١١٦٫٩٢	٣٠٨٫٦٧	٠٫٦٢٨٤٥	١٫٧٠٤٨
−٩٠	٠٫٠٠٢٨٣٦	٤٫٤٢٦٤	١٦٥١٫٩	١٢١٫١٤	٣١٠٫٩٠	٠٫٦٥١٨٢	١٫٦٨٧٩
−٨٥	٠٫٠٠٤٢٣٠	٣٫٠٤٤٩	١٦٣٨٫٧	١٢٥٫٣٦	٣١٣٫١٦	٠٫٦٧٤٥٧	١٫٦٧٢٧
−٨٠	٠٫٠٠٦١٦٠	٢٫١٤٣٨	١٦٢٥٫٥	١٢٩٫٥٩	٣١٥٫٤٤	٠٫٦٩٦٧٣	١٫٦٥٨٩
−٧٥	٠٫٠٠٨٧٧٤	١٫٥٤١٦	١٦١٢٫١	١٣٣٫٨٢	٣١٧٫٧٤	٠٫٧١٨٣٥	١٫٦٤٦٥
−٧٠	٠٫٠١٢٢٤٦	١٫١٣٠١	١٥٩٨٫٧	١٣٨٫٠٦	٣٢٠٫٠٥	٠٫٧٣٩٤٨	١٫٦٣٥٣
−٦٥	٠٫٠١٦٧٧٦	٠٫٨٤٣٣٢	١٥٨٥٫٢	١٤٢٫٣٢	٣٢٢٫٣٨	٠٫٧٦٠١٥	١٫٦٢٥٢
−٦٠	٠٫٠٢٢٥٩١	٠٫٦٣٩٥٦	١٥٧١٫٥	١٤٦٫٥٨	٣٢٤٫٧١	٠٫٧٨٠٤٠	١٫٦١٦١
−٥٥	٠٫٠٢٩٩٤٤	٠٫٤٩٢٣٠	١٥٥٧٫٨	١٥٠٫٨٧	٣٢٧٫٠٥	٠٫٨٠٠٢٥	١٫٦٠٧٩
−٥٠	٠٫٠٣٩١١٥	٠٫٣٨٤١٥	١٥٤٣٫٩	١٥٥٫١٨	٣٢٩٫٤٠	٠٫٨١٩٧٤	١٫٦٠٠٥
−٤٥	٠٫٠٥٠٤٠٨	٠٫٣٠٣٥٥	١٥٢٩٫٩	١٥٩٫٥١	٣٣١٫٧٤	٠٫٨٣٨٩٠	١٫٥٩٣٨
−٤٠	٠٫٠٦٤١٥٢	٠٫٢٤٢٦٤	١٥١٥٫٧	١٦٣٫٨٦	٣٣٤٫٠٩	٠٫٨٥٧٧٥	١٫٥٨٧٩
−٣٥	٠٫٠٨٠٧٠١	٠٫١٩٦٠٣	١٥٠١٫٤	١٦٨٫٢٥	٣٣٦٫٤٣	٠٫٨٧٦٣٢	١٫٥٨٢٥
−٣٠	٠٫١٠٠٤٣	٠٫١٥٩٩٣	١٤٨٦٫٩	١٧٢٫٦٧	٣٣٨٫٧٦	٠٫٨٩٤٦٢	١٫٥٧٧٧
−٢٩٫٧٩	٠٫١٠١٣٢٥	٠٫١٥٨٦١	١٤٨٦٫٣	١٧٢٫٨٥	٣٣٨٫٨٦	٠٫٨٩٥٣٨	١٫٥٧٧٥
−٢٥	٠٫١٢٣٧٣	٠٫١٣١٦٦	١٤٧٢٫٣	١٧٧٫١٢	٣٤١٫٠٨	٠٫٩١٢٦٩	١٫٥٧٣٤
−٢٠	٠٫١٥١٠١	٠٫١٠٩٢٩	١٤٥٧٫٤	١٨١٫٦١	٣٤٣٫٣٩	٠٫٩٣٠٥٣	١٫٥٦٩٦
−١٥	٠٫١٨٢٧٢	٠٫٠٩١٤٢	١٤٤٢٫٤	١٨٦٫١٤	٣٤٥٫٦٩	٠٫٩٤٨١٧	١٫٥٦٦٢
−١٠	٠٫٢١٩٢٨	٠٫٠٧٧٠٢	١٤٢٧٫١	١٩٠٫٧٢	٣٤٧٫٩٦	٠٫٩٦٥٦١	١٫٥٦٣٢
−٥	٠٫٢٦١١٧	٠٫٠٦٥٣١	١٤١١٫٥	١٩٥٫٣٣	٣٥٠٫٢٢	٠٫٩٨٢٨٩	١٫٥٦٠٥
٠	٠٫٣٠٨٨٥	٠٫٠٥٥٧١	١٣٩٥٫٦	٢٠٠٫٠٠	٣٥٢٫٤٤	١٫٠٠٠٠	١٫٥٥٨١
٢	٠٫٣٢٩٦٦	٠٫٠٥٢٣٦	١٣٨٩٫٢	٢٠١٫٨٨	٣٥٣٫٣٢	١٫٠٠٦٨	١٫٥٥٧٢
٤	٠٫٣٥١٥٠	٠٫٠٤٩٢٥	١٣٨٢٫٧	٢٠٣٫٧٧	٣٥٤٫٢٠	١٫٠١٣٦	١٫٥٥٦٤
٦	٠٫٣٧٤٤١	٠٫٠٤٦٣٧	١٣٧٦٫٢	٢٠٥٫٦٦	٣٥٥٫٠٧	١٫٠٢٠٣	١٫٥٥٥٦
٨	٠٫٣٩٨٤٢	٠٫٠٤٣٦٩	١٣٦٩٫٦	٢٠٧٫٥٧	٣٥٥٫٩٣	١٫٠٢٧١	١٫٥٥٤٨
١٠	٠٫٤٢٣٥٦	٠٫٠٤١١٩	١٣٦٣٫٠	٢٠٩٫٤٨	٣٥٦٫٧٩	١٫٠٣٣٨	١٫٥٥٤١
١٢	٠٫٤٤٩٨٦	٠٫٠٣٨٨٧	١٣٥٦٫٢	٢١١٫٤٠	٣٥٧٫٦٥	١٫٠٤٠٥	١٫٥٥٣٣
١٤	٠٫٤٧٧٣٧	٠٫٠٣٦٧٠	١٣٤٩٫٥	٢١٣٫٣٣	٣٥٨٫٤٩	١٫٠٤٧٢	١٫٥٥٢٧
١٦	٠٫٥٠٦١٠	٠٫٠٣٤٦٨	١٣٤٢٫٦	٢١٥٫٢٧	٣٥٩٫٣٣	١٫٠٥٣٨	١٫٥٥٢٠
١٨	٠٫٥٣٦١٠	٠٫٠٣٢٧٩	١٣٣٥٫٧	٢١٧٫٢٢	٣٦٠٫١٦	١٫٠٦٠٥	١٫٥٥١٤
٢٠	٠٫٥٦٧٤٠	٠٫٠٣١٠٢	١٣٢٨٫٧	٢١٩٫١٨	٣٦٠٫٩٨	١٫٠٦٧١	١٫٥٥٠٨
٢٢	٠٫٦٠٠٠٣	٠٫٠٢٩٣٧	١٣٢١٫٦	٢٢١٫١٤	٣٦١٫٨٠	١٫٠٧٣٧	١٫٥٥٠٢
٢٤	٠٫٦٣٤٠٣	٠٫٠٢٧٨٢	١٣١٤٫٥	٢٢٣٫١٢	٣٦٢٫٦٠	١٫٠٨٠٣	١٫٥٤٩٧
٢٦	٠٫٦٦٩٤٣	٠٫٠٢٦٣٧	١٣٠٧٫٣	٢٢٥٫١١	٣٦٣٫٤٠	١٫٠٨٦٨	١٫٥٤٩١
٢٨	٠٫٧٠٦٢٦	٠٫٠٢٥٠٠	١٢٩٩٫٩	٢٢٧٫١٠	٣٦٤٫١٩	١٫٠٩٣٤	١٫٥٤٨٦

جدول ٢,١أ ..... تابع

درجة الحرارة ° م	الضغط ميجابسكال	حجم البخار م^{3}/كجم	كثافة السائل كجم/م^{3}	أنثالبي: سائل كيلوجول/كجم	أنثالبي: بخار كيلوجول/كجم	أنتروبي: سائل كيلوجول/كجم ك	أنتروبي: بخار كيلوجول/كجم ك
٣٠	٠,٧٤٤٥٧	٠,٠٢٣٧٢	١٢٩٢,٥	٢٢٩,١١	٣٦٤,٩٦	١,٠٩٩٩	١,٥٤٨١
٣٢	٠,٧٨٤٣٩	٠,٠٢٢٥٢	١٢٨٥,٠٠	٢٣١,١٢	٣٦٥,٧٣	١,١٠٦٤	١,٥٤٧٦
٣٤	٠,٨٢٥٧٤	٠,٠٢١٣٨	١٢٧٧,٤	٢٣٣,١٥	٣٦٦,٤٨	١,١١٣٠	١,٥٤٧١
٣٦	٠,٨٦٨٦٨	٠,٠٢٠٣٢	١٢٦٩,٧	٢٣٥,١٨	٣٦٧,٢٢	١,١١٩٥	١,٥٤٦٦
٣٨	٠,٩١٣٢٤	٠,٠١٩٣١	١٢٦١,٩	٢٣٧,٢٣	٣٦٧,٩٠	١,١٢٥٩	١,٥٤٦١
٤٠	٠,٩٥٩٤٤	٠,٠١٨٣٦	١٢٥٣,٩	٢٣٩,٢٩	٣٦٨,٦٧	١,١٣٢٤	١,٥٤٥٦
٤٢	١,٠٠٧٣	٠,٠١٧٤٦	١٢٤٥,٩	٢٤١,٣٦	٣٦٩,٣٧	١,١٣٨٩	١,٥٤٥١
٤٤	١,٠٥٧٠	٠,٠١٦٦٢	١٢٣٧,٧	٢٤٣,٤٤	٣٧٠,٠٦	١,١٤٥٣	١,٥٤٤٦
٤٦	١,١٠٨٤	٠,٠١٥٨١	١٢٢٩,٣	٢٤٥,٥٤	٣٧٠,٧٣	١,١٥١٨	١,٥٤٤١
٤٨	١,١٦١٦	٠,٠١٥٠٦	١٢٢٠,٩	٢٤٧,٦٤	٣٧١,٣٨	١,١٥٨٢	١,٥٤٣٥
٥٠	١,٢١٦٧	٠,٠١٤٣٤	١٢١٢,٢	٢٤٩,٧٦	٣٧٢,٠٢	١,١٦٤٧	١,٥٤٣٠
٥٢	١,٢٧٣٦	٠,٠١٣٦٦	١٢٠٣,٥	٢٥١,٩٠	٣٧٢,٦٤	١,١٧١١	١,٥٤٢٥
٥٤	١,٣٣٢٥	٠,٠١٣٠١	١١٩٤,٥	٢٥٤,٠٤	٣٧٣,٢٤	١,١٧٧٦	١,٥٤١٩
٥٦	١,٣٩٣٤	٠,٠١٢٣٩	١١٨٥,٤	٢٥٦,٢١	٣٧٣,٨٢	١,١٨٤٠	١,٥٤١٣
٥٨	١,٤٥٦٢	٠,٠١١٨١	١١٧٦,١	٢٥٨,٣٨	٣٧٤,٣٨	١,١٩٠٤	١,٥٤٠٧
٦٠	١,٥٢١٢	٠,٠١١٢٦	١١٦٦,٦	٢٦٠,٥٨	٣٧٤,٩١	١,١٩٦٩	١,٥٤٠١
٦٢	١,٥٨٨٣	٠,٠١٠٧٣	١١٥٦,٩	٢٦٢,٧٩	٣٧٥,٤٢	١,٢٠٣٣	١,٥٣٩٤
٦٤	١,٦٥٧٥	٠,٠١٠٢٣	١١٤٦,٩	٢٦٥,٠٢	٣٧٥,٩٠	١,٢٠٩٨	١,٥٣٨٧
٦٦	١,٧٢٨٩	٠,٠٠٩٧٤٦	١١٣٦,٧	٢٦٧,٢٧	٣٧٦,٣٦	١,٢١٦٢	١,٥٣٧٩
٦٨	١,٨٠٢٦	٠,٠٠٩٢٨٩	١١٢٦,٣	٢٦٩,٥٤	٣٧٦,٧٨	١,٢٢٢٧	١,٥٣٧١
٧٠	١,٨٧٨٦	٠,٠٠٨٨٥٢	١١١٥,٦	٢٧١,٨٣	٣٧٧,١٧	١,٢٢٩٢	١,٥٣٦٢
٧٢	١,٩٥٧٠	٠,٠٠٨٤٣٤	١١٠٤,٦	٢٧٤,١٥	٣٧٧,٥٣	١,٢٣٥٧	١,٥٣٥٣
٧٤	٢,٠٣٧٨	٠,٠٠٨٠٣٤	١٠٩٣,٣	٢٧٦,٤٩	٣٧٧,٨٥	١,٢٤٢٣	١,٥٣٤٣
٧٦	٢,١٢١٠	٠,٠٠٧٦٥١	١٠٨١,٦	٢٧٨,٨٦	٣٧٨,١٣	١,٢٤٨٩	١,٥٣٣٢
٧٨	٢,٢٠٦٩	٠,٠٠٧٢٨٣	١٠٦٩,٦	٢٨١,٢٧	٣٧٨,٣٦	١,٢٥٥٥	١,٥٣٢٠
٨٠	٢,٢٩٥٣	٠,٠٠٦٩٣١	١٠٥٧,٢	٢٨٣,٧٠	٣٧٨,٥٤	١,٢٦٢٢	١,٥٣٠٨
٨٥	٢,٥٢٨٢	٠,٠٠٦١٠٦	١٠٢٤,١	٢٨٩,٩٧	٣٧٨,٧٥	١,٢٧٩٢	١,٥٢٧١
٩٠	٢,٧٧٩٠	٠,٠٠٥٣٥٠	٩٨٧,٦٠	٢٩٦,٥٦	٣٧٨,٥٢	١,٢٩٦٨	١,٥٢٢٥
٩٥	٣,٠٤٩٠	٠,٠٠٤٦٤٨	٩٤٦,٤٤	٣٠٣,٥٨	٣٧٧,٦٧	١,٣١٥٢	١,٥١٦٥
١٠٠	٣,٣٣٩٩	٠,٠٠٣٩٨٠	٨٩٨,٥٥	٣١١,٢٦	٣٧٥,٨٨	١,٣٣٥١	١,٥٠٨٣
١٠٥	٣,٦٥٣٨	٠,٠٠٣٣١١	٨٣٩,١٠	٣٢٠,٠٨	٣٧٢,٤١	١,٣٥٧٦	١,٤٩٦٠
١١٠	٣,٩٩٤٣	٠,٠٠٢٥١٧	٧٤٦,٥٨	٣٣١,٩١	٣٦٤,٠٢	١,٣٨٧٥	١,٤٧١٣
*١١١,٨٠	٤,١٢٥	٠,٠٠١٧٩	٥٥٨,٠٠	٣٤٨,٤	٣٤٨,٤	١,٤٣٠	١,٤٣٠

* النقطة الحرجة



شكل ٢, أ خريطة الضغط - الأنثالبى لمبرد ١٢

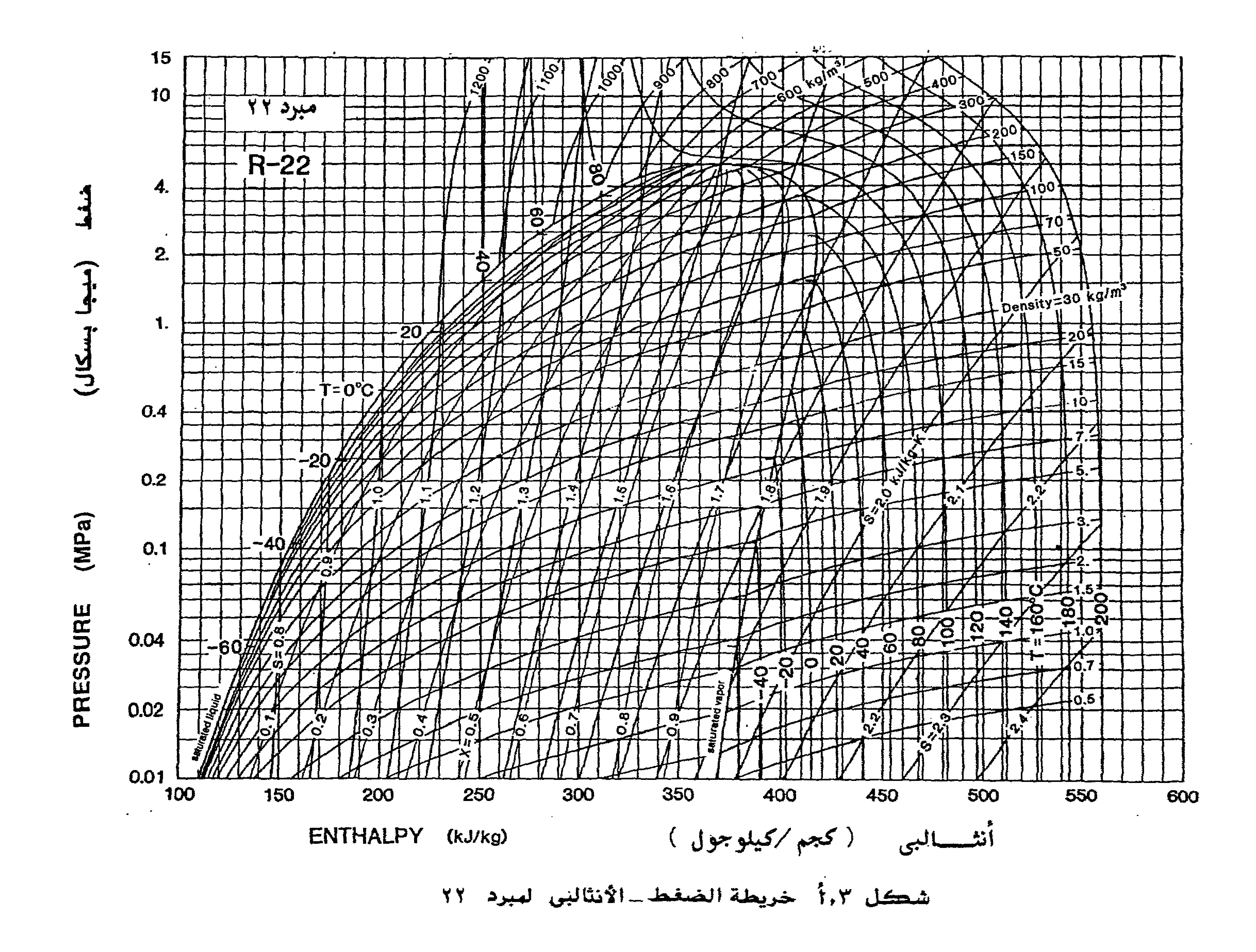
جدول ١,٣ أ خواص السائل المشبع والبخار المشبع لمبرد ٢٢ (..... يتبع)

درجة الحرارة °م	الضغط ميجابسكال	حجم البخار م^3/كجم	كثافة السائل كجم/م^3	انثالبي		انتروبي	
				سائل كيلوجول/كجم	بخار كيلوجول/كجم	سائل كيلوجول/كجم ك	بخار كيلوجول/كجم ك
-٩٠	٠,٠٠٤٧٤٨	٣,٦٩٣٩	١٥٤٢,٨	٩٨,٥٧٥	٣٦٤,٢٠	٠,٥٥٠٣٢	٢,٠٠٠٦
-٨٥	٠,٠٠٧٠٨٤	٢,٥٣٩٤	١٥٢٩,٩	١٠٤,٥٤	٣٦٦,٦٣	٠,٥٨٢٤٦	١,٩٧٥٤
-٨٠	٠,٠١٠٣٠٨	١,٧٨٨٣	١٥١٦,٨	١١٠,٤٢	٣٦٩,٠٦	٠,٦١٣٢٦	١,٩٥٢٤
-٧٥	٠,٠١٤٦٦٢	١,٢٨٧٠	١٥٠٣,٦	١١٦,٢١	٣٧١,٤٩	٠,٦٤٢٨٤	١,٩٣١٢
-٧٠	٠,٠٢٠٤٢٤	٠,٩٤٤٧٧	١٤٩٠,٣	١٢١,٩٢	٣٧٣,٩١	٠,٦٧١٣٢	١,٩١١٧
-٦٥	٠,٠٢٧٩١٤	٠,٧٠٦٠٩	١٤٧٦,٧	١٢٧,٥٨	٣٧٦,٣٢	٠,٦٩٨٧٩	١,٨٩٣٨
-٦٠	٠,٠٣٧٤٩١	٠,٥٣٦٤١	١٤٦٣,١	١٣٣,١٨	٣٧٨,٧٢	٠,٧٢٥٣٥	١,٨٧٧٣
-٥٥	٠,٠٤٩٥٥٦	٠,٤١٣٦٢	١٤٤٩,٢	١٣٨,٧٤	٣٨١,١٠	٠,٧٥١٠٩	١,٨٦٢١
-٥٠	٠,٠٦٤٥٤٩	٠,٣٢٣٣٠	١٤٣٥,٢	١٤٤,٢٧	٣٨٣,٤٥	٠,٧٧٦١٠	١,٨٤٧٩
-٤٥	٠,٠٨٢٩٤٧	٠,٢٥٥٨٦	١٤٢١,٠٠	١٤٩,٧٧	٣٨٥,٧٧	٠,٨٠٠٤٤	١,٨٣٤٨
-٤٠,٨٢	٠,١٠١٣٢٥	٠,٢١٢٢٣	١٤٠٨,٩	١٥٤,٣٧	٣٨٧,٦٩	٠,٨٢٠٣٤	١,٨٢٤٦
-٤٠	٠,١٠٥٢٧	٠,٢٠٤٨٠	١٤٠٦,٥	١٥٥,٢٦	٣٨٨,٠٦	٠,٨٢٤١٩	١,٨٢٢٧
-٣٨	٠,١١٥٤٢	٠,١٨٧٩٠	١٤٠٠,٧	١٥٧,٤٦	٣٨٨,٩٦	٠,٨٣٣٥٤	١,٨١٨٠
-٣٦	٠,١٢٦٣٢	٠,١٧٢٦٨	١٣٩٤,٨	١٥٩,٦٦	٣٨٩,٨٦	٠,٨٤٢٨١	١,٨١٣٥
-٣٤	٠,١٣٨٠١	٠,١٥٨٩٤	١٣٨٨,٩	١٦١,٨٦	٣٩٠,٧٥	٠,٨٥٢٠٠	١,٨٠٩١
-٣٢	٠,١٥٠٥٣	٠,١٤٦٥١	١٣٨٢,٩	١٦٤,٠٦	٣٩١,٦٤	٠,٨٦١١٣	١,٨٠٤٩
-٣٠	٠,١٦٣٩١	٠,١٣٥٢٤	١٣٧٦,٩	١٦٦,٢٦	٣٩٢,٥٢	٠,٨٧٠١٨	١,٨٠٠٧
-٢٨	٠,١٧٨٢١	٠,١٢٥٠٢	١٣٧٠,٩	١٦٨,٤٦	٣٩٣,٣٩	٠,٨٧٩١٧	١,٧٩٦٧
-٢٦	٠,١٩٣٤٦	٠,١١٥٧٣	١٣٦٤,٨	١٧٠,٦٧	٣٩٤,٢٥	٠,٨٨٨١٠	١,٧٩٢٧
-٢٤	٠,٢٠٩٦٩	٠,١٠٧٢٦	١٣٥٨,٧	١٧٢,٨٩	٣٩٥,١٠	٠,٨٩٦٩٧	١,٧٨٨٩
-٢٢	٠,٢٢٦٩٦	٠,٠٩٩٥٤	١٣٥٢,٦	١٧٥,١٠	٣٩٥,٩٥	٠,٩٠٥٧٩	١,٧٨٥١
-٢٠	٠,٢٤٥٣١	٠,٠٩٢٤٩	١٣٤٦,٤	١٧٧,٣٣	٣٩٦,٧٩	٠,٩١٤٥٥	١,٧٨١٥
-١٨	٠,٢٦٤٧٧	٠,٠٨٦٠٣	١٣٤٠,١	١٧٩,٥٦	٣٩٧,٦٢	٠,٩٢٣٢٧	١,٧٧٧٩
-١٦	٠,٢٨٥٤٠	٠,٠٨٠١٢	١٣٣٣,٨	١٨١,٧٩	٣٩٨,٤٣	٠,٩٣١٩٤	١,٧٧٤٤
-١٤	٠,٣٠٧٢٤	٠,٠٧٤٧٠	١٣٢٧,٥	١٨٤,٠٤	٣٩٩,٢٤	٠,٩٤٠٥٧	١,٧٧١٠
-١٢	٠,٣٣٠٣٤	٠,٠٦٩٧١	١٣٢١,١	١٨٦,٢٩	٤٠٠,٠٤	٠,٩٤٩١٦	١,٧٦٧٧
-١٠	٠,٣٥٤٧٤	٠,٠٦٥١٣	١٣١٤,٦	١٨٨,٥٥	٤٠٠,٨٣	٠,٩٥٧٧١	١,٧٦٤٤
-٨	٠,٣٨٠٤٩	٠,٠٦٠٩٠	١٣٠٨,١	١٩٠,٨٢	٤٠١,٦١	٠,٩٦٦٢٣	١,٧٦١٢
-٦	٠,٤٠٧٦٣	٠,٠٥٧٠١	١٣٠١,٥	١٩٣,١٠	٤٠٢,٣٧	٠,٩٧٤٧١	١,٧٥٨١
-٤	٠,٤٣٦٢٢	٠,٠٥٣٤١	١٢٩٤,٩	١٩٥,٣٩	٤٠٣,١٢	٠,٩٨٣١٧	١,٧٥٥٠
-٢	٠,٤٦٦٣٠	٠,٠٥٠٠٨	١٢٨٨,٢	١٩٧,٦٩	٤٠٣,٨٧	٠,٩٩١٦٠	١,٧٥٢٠
٠	٠,٤٩٧٩٢	٠,٠٤٧٠٠	١٢٨١,٥	٢٠٠,٠٠	٤٠٤,٥٩	١,٠٠٠٠٠	١,٧٤٩٠
٢	٠,٥٣١١٣	٠,٠٤٤١٥	١٢٧٤,٧	٢٠٢,٣٢	٤٠٥,٣١	١,٠٠٨٤	١,٧٤٦١
٤	٠,٥٦٥٩٩	٠,٠٤١٥٠	١٢٦٧,٨	٢٠٤,٦٦	٤٠٦,٠١	١,٠١٦٧	١,٧٤٣٢
٦	٠,٦٠٢٥٤	٠,٠٣٩٠٤	١٢٦٠,٨	٢٠٧,٠١	٤٠٦,٧٠	١,٠٢٥١	١,٧٤٠٤
٨	٠,٦٤٠٨٣	٠,٠٣٦٧٥	١٢٥٣,٨	٢٠٩,٣٧	٤٠٧,٣٧	١,٠٣٣٤	١,٧٣٧٦

جدول ١,٣ ..... تابع

درجة الحرارة ° م	الضغط ميجابسكال	حجم البخار م³/كجم	كثافة السائل كجم/م³	انثالبي سائل كيلوجول/كجم	انثالبي بخار كيلوجول/كجم	انتروبي سائل كيلوجول/كجم ك	انتروبي بخار كيلوجول/كجم ك
١٠	٠٫٦٨٠٩١	٠٫٠٣٤٦٢	١٢٤٦٫٧	٢١١٫٧٤	٤٠٨٫٠٣	١٫٠٤١٧	١٫٧٣٤٩
١٢	٠٫٧٢٢٨٥	٠٫٠٣٢٦٣	١٢٣٩٫٥	٢١٤٫١٣	٤٠٨٫٦٧	١٫٠٥٠٠	١٫٧٣٢٢
١٤	٠٫٧٦٦٦٨	٠٫٠٣٠٧٨	١٢٣٢٫٣	٢١٦٫٥٤	٤٠٩٫٢٩	١٫٠٥٨٣	١٫٧٢٩٥
١٦	٠٫٨١٢٤٦	٠٫٠٢٩٠٥	١٢٢٤٫٩	٢١٨٫٩٦	٤٠٩٫٩٠	١٫٠٦٦٥	١٫٧٢٦٩
١٨	٠٫٨٦٠٢٥	٠٫٠٢٧٤٣	١٢١٧٫٥	٢٢١٫٤٠	٤١٠٫٤٩	١٫٠٧٤٨	١٫٧٢٤٣
٢٠	٠٫٩١٠٠٩	٠٫٠٢٥٩٢	١٢١٠٫٠	٢٢٣٫٨٥	٤١١٫٠٦	١٫٠٨٣١	١٫٧٢١٧
٢٢	٠٫٩٦٢٠٥	٠٫٠٢٤٥١	١٢٠٢٫٤	٢٢٦٫٣٢	٤١١٫٦١	١٫٠٩١٣	١٫٧١٩١
٢٤	١٫٠١٦٢	٠٫٠٢٣١٨	١١٩٤٫٦	٢٢٨٫٨٠	٤١٢٫١٤	١٫٠٩٩٦	١٫٧١٦٥
٢٦	١٫٠٧٢٥	٠٫٠٢١٩٣	١١٨٦٫٨	٢٣١٫٣١	٤١٢٫٦٥	١٫١٠٧٨	١٫٧١٤٠
٢٨	١٫١٣١٢	٠٫٠٢٠٧٦	١١٧٨٫٩	٢٣٣٫٨٣	٤١٣٫١٣	١٫١١٦٠	١٫٧١١٤
٣٠	١٫١٩٢١	٠٫٠١٩٦٧	١١٧٠٫٨	٢٣٦٫٣٨	٤١٣٫٦٠	١٫١٢٤٣	١٫٧٠٨٩
٣٢	١٫٢٥٥٥	٠٫٠١٨٦٣	١١٦٢٫٦	٢٣٨٫٩٤	٤١٤٫٠٣	١٫١٣٢٥	١٫٧٠٦٣
٣٤	١٫٣٢١٣	٠٫٠١٧٦٦	١١٥٤٫٣	٢٤١٫٥٢	٤١٤٫٤٥	١٫١٤٠٨	١٫٧٠٣٨
٣٦	١٫٣٨٩٦	٠٫٠١٦٧٤	١١٤٥٫٩	٢٤٤٫١٣	٤١٤٫٨٣	١٫١٤٩٠	١٫٧٠١٢
٣٨	١٫٤٦٠٥	٠٫٠١٥٨٨	١١٣٧٫٣	٢٤٦٫٧٥	٤١٥٫١٩	١٫١٥٧٣	١٫٦٩٨٧
٤٠	١٫٥٣٤٠	٠٫٠١٥٠٦	١١٢٨٫٦	٢٤٩٫٤٠	٤١٥٫٥٢	١٫١٦٥٦	١٫٦٩٦١
٤٢	١٫٦١٠٢	٠٫٠١٤٢٩	١١١٩٫٧	٢٥٢٫٠٧	٤١٥٫٨٢	١٫١٧٣٩	١٫٦٩٣٤
٤٤	١٫٦٨٩٢	٠٫٠١٣٥٦	١١١٠٫٦	٢٥٤٫٧٧	٤١٦٫٠٨	١٫١٨٢٢	١٫٦٩٠٨
٤٦	١٫٧٧١٠	٠٫٠١٢٨٧	١١٠١٫٤	٢٥٧٫٤٩	٤١٦٫٣١	١٫١٩٠٥	١٫٦٨٨١
٤٨	١٫٨٥٥٦	٠٫٠١٢٢١	١٠٩١٫٩	٢٦٠٫٢٤	٤١٦٫٥٠	١٫١٩٨٩	١٫٦٨٥٤
٥٠	١٫٩٤٣٢	٠٫٠١١٥٩	١٠٨٢٫٣	٢٦٣٫٠٢	٤١٦٫٦٥	١٫٢٠٧٢	١٫٦٨٢٦
٥٢	٢٫٠٣٣٩	٠٫٠١١٠١	١٠٧٢٫٤	٢٦٥٫٨٣	٤١٦٫٧٥	١٫٢١٥٦	١٫٦٧٩٨
٥٤	٢٫١٢٧٦	٠٫٠١٠٤٥	١٠٦٢٫٣	٢٦٨٫٦٧	٤١٦٫٨١	١٫٢٢٤١	١٫٦٧٦٩
٥٦	٢٫٢٢٤٤	٠٫٠٠٩٩١٥	١٠٥١٫٩	٢٧١٫٥٥	٤١٦٫٨٣	١٫٢٣٢٦	١٫٦٧٣٩
٥٨	٢٫٣٢٤٥	٠٫٠٠٩٤٠٩	١٠٤١٫٣	٢٧٤٫٤٦	٤١٦٫٧٩	١٫٢٤١١	١٫٦٧٠٩
٦٠	٢٫٤٢٧٩	٠٫٠٠٨٩٢٧	١٠٣٠٫٣	٢٧٧٫٤١	٤١٦٫٦٩	١٫٢٤٩٧	١٫٦٦٧٧
٦٥	٢٫٧٠١٥	٠٫٠٠٧٨١٦	١٠٠١٫٣	٢٨٤٫٩٨	٤١٦٫١٦	١٫٢٧١٤	١٫٦٥٩٤
٧٠	٢٫٩٩٧٥	٠٫٠٠٦٨١٩	٩٦٩٫٦٨	٢٩٢٫٨٨	٤١٥٫١٤	١٫٢٩٣٧	١٫٦٥٠٠
٧٥	٣٫٣١٧٥	٠٫٠٠٥٩١٧	٩٣٤٫٣٨	٣٠١٫٢٢	٤١٣٫٤٦	١٫٣١٦٩	١٫٦٣٩٣
٨٠	٣٫٦٦٣٣	٠٫٠٠٥٠٨٦	٨٩٣٫٨٩	٣١٠٫١٨	٤١٠٫٨٨	١٫٣٤١٤	١٫٦٢٦٥
٨٥	٤٫٠٣٧٠	٠٫٠٠٤٣٠١	٨٤٥٫١٧	٣٢٠٫١٣	٤٠٦٫٩٠	١٫٣٦٨١	١٫٦١٠٤
٩٠	٤٫٤٤١٣	٠٫٠٠٣٥١٧	٧٨٠٫٦٠	٣٣١٫٩٦	٤٠٠٫٢٨	١٫٣٩٩٦	١٫٥٨٧٧
٩٥	٤٫٨٨٠٨	٠٫٠٠٢٥٤٧	٦٦٠٫٩٤	٣٥٠٫٦٧	٣٨٤٫٩٥	١٫٤٤٩٠	١٫٥٤٢١
٩٦٫١٥*	٤٫٩٨٨	٠٫٠٠١٩٥	٥١٣٫٠	٣٦٨٫١	٣٦٨٫١	١٫٤٩٦	١٫٤٩٦

* النقطة الحرجة



شكل ٣,١أ خريطة الضغط ـ الأنثالبى لمبرد ٢٢

جدول ٤,أ خواص السائل المشبع والبخار المشبع لمبرد ٧١٧ (الأمونيا) (..... يتبع)

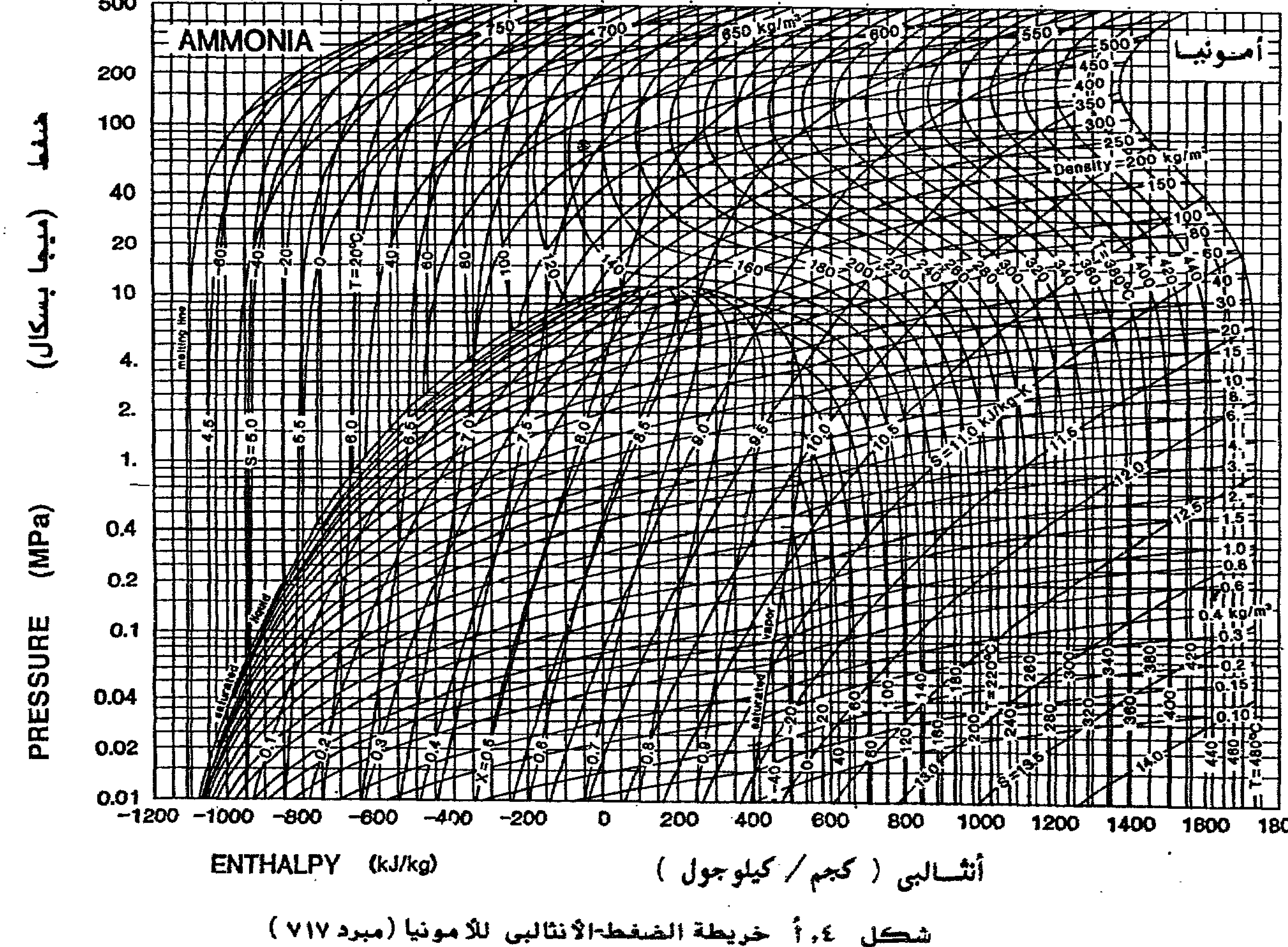
درجة الحرارة ° م	الضغط ميجابسكال	حجم البخار م³/كجم	كثافة السائل كجم/م³	انثالبي سائل كيلوجول/كجم	انثالبي بخار كيلوجول/كجم	انتروبي سائل كيلوجول/كجم ك	انتروبي بخار كيلوجول/كجم ك
-٧٧٫٦٧ **	٠٫٠٠٠٦٠٦٠	١٥٫٦٨٩	٧٣٣٫٨٦	-١١١٠٫١١	٣٨٠٫٠٩	٤٫٢٠٣٢	١١٫٨٢٧٨
-٧٥	٠٫٠٠٠٧٤٨١	١٢٫٨٧٤	٧٣٠٫٩٠	-١٠٩٧٫٣٧	٣٨٥٫٠٨	٤٫٢٦٧٩	١١٫٧٥٠٧
-٧٠	٠٫٠٠١٠٩١١	٩٫٠٣٦٢	٧٢٥٫٣٣	-١٠٧٤٫٤٤	٣٩٤٫٣١	٤٫٣٨٢٢	١١٫٦١٣٤
-٦٥	٠٫٠٠١٥٥٨٨	٦٫٤٦٩٤	٧١٩٫٦٦	-١٠٥٢٫٢٤	٤٠٣٫٣٨	٤٫٤٩٠٢	١١٫٤٨٤٥
-٦٠	٠٫٠٠٢١٨٤٨	٤٫٧١٦٩	٧١٣٫٨٩	-١٠٣٠٫٣٨	٤١٢٫٢٧	٤٫٥٩٣٩	١١٫٣٦٣٣
-٥٥	٠٫٠٠٣٠٠٨٦	٣٫٤٩٧٣	٧٠٨٫٠٠	-١٠٠٨٫٦٣	٤٢٠٫٩٧	٤٫٦٩٤٧	١١٫٢٤٩١
-٥٠	٠٫٠٠٤٠٧٥٦	٢٫٦٣٣٤	٧٠٢٫٠٢	-٩٨٦٫٨٨	٤٢٩٫٤٥	٤٫٧٩٣٢	١١٫١٤١٣
-٤٥	٠٫٠٠٥٤٣٧٩	٢٫٠١١٤	٦٩٥٫٩٧	-٩٦٥٫٠٦	٤٣٧٫٧٠	٤٫٨٨٩٨	١١٫٠٣٩٤
-٤٠	٠٫٠٠٧١٥٤٠	١٫٥٥٦٧	٦٨٩٫٨٦	-٩٤٣٫١٢	٤٤٥٫٧٠	٤٫٩٨٤٩	١٠٫٩٤٢٨
-٣٨	٠٫٠٠٧٩٥٣٨	١٫٤٠٩٩	٦٨٧٫٤٠	-٩٣٤٫٣١	٤٤٨٫٨٣	٥٫٠٢٢٤	١٠٫٩٠٥٦
-٣٦	٠٫٠٠٨٨٢٥١	١٫٢٧٩٤	٦٨٤٫٩٤	-٩٢٥٫٤٨	٤٥١٫٩١	٥٫٠٥٩٨	١٠٫٨٦٩٢
-٣٤	٠٫٠٠٩٧٧٢٥	١٫١٦٣٠	٦٨٢٫٤٦	-٩١٦٫٦٣	٤٥٤٫٩٦	٥٫٠٩٦٩	١٠٫٨٣٣٤
-٣٣٫٣٣	٠٫٠١٠١٣٢٥	١٫١٢٤٤	٦٨١٫٥٧	-٩١٣٫٤٤	٤٥٦٫٠٤	٥٫١١٠٢	١٠٫٨٢٠٨
-٣٢	٠٫٠١٠٨٠١	١٫٠٥٩٢	٦٧٩٫٩٨	-٩٠٧٫٧٥	٤٥٧٫٩٥	٥٫١٣٣٨	١٠٫٧٩٨٤
-٣٠	٠٫٠١١٩١٥	٠٫٩٦٦٢٥	٦٧٧٫٤٩	-٨٩٨٫٨٦	٤٦٠٫٩١	٥٫١٧٠٤	١٠٫٧٦٤١
-٢٨	٠٫٠١٣١٢٠	٠٫٨٨٢٩٤	٦٧٤٫٩٩	-٨٨٩٫٩٤	٤٦٣٫٨١	٥٫٢٠٦٩	١٠٫٧٣٠٤
-٢٦	٠٫٠١٤٤٢١	٠٫٨٠٨١٢	٦٧٢٫٤٧	-٨٨١٫٠١	٤٦٦٫٦٧	٥٫٢٤٣١	١٠٫٦٩٧٤
-٢٤	٠٫٠١٥٨٢٥	٠٫٧٤٠٨١	٦٦٩٫٩٥	-٨٧٢٫٠٥	٤٦٩٫٤٩	٥٫٢٧٩١	١٠٫٦٦٥٠
-٢٢	٠٫٠١٧٣٣٥	٠٫٦٨٠١٣	٦٦٧٫٤٢	-٨٦٣٫٠٧	٤٧٢٫٢٥	٥٫٣١٤٩	١٠٫٦٣٣٢
-٢٠	٠٫٠١٨٩٥٩	٠٫٦٢٥٣٥	٦٦٤٫٨٨	-٨٥٤٫٠٦	٤٧٤٫٩٦	٥٫٣٥٠٥	١٠٫٦٠١٩
-١٨	٠٫٠٢٠٧٠٢	٠٫٥٧٥٨٠	٦٦٢٫٣٢	-٨٤٥٫٠٤	٤٧٧٫٦٣	٥٫٣٨٥٩	١٠٫٥٧١٣
-١٦	٠٫٠٢٢٥٧١	٠٫٥٣٠٩٢	٦٥٩٫٧٥	-٨٣٥٫٩٩	٤٨٠٫٢٤	٥٫٤٢١٢	١٠٫٥٤١١
-١٤	٠٫٠٢٤٥٧١	٠٫٤٩٠١٩	٦٥٧٫١٦	-٨٢٦٫٩٢	٤٨٢٫٨٠	٥٫٤٥٦٢	١٠٫٥١١٦
-١٢	٠٫٠٢٦٧١٠	٠٫٤٥٣١٨	٦٥٤٫٥٧	-٨١٧٫٨٣	٤٨٥٫٣١	٥٫٤٩١٠	١٠٫٤٨٢٥
-١٠	٠٫٠٢٨٩٩٣	٠٫٤١٩٤٩	٦٥١٫٩٥	-٨٠٨٫٧١	٤٨٧٫٧٦	٥٫٥٢٥٧	١٠٫٤٥٣٩
-٨	٠٫٠٣١٤٢٧	٠٫٣٨٨٧٩	٦٤٩٫٣٢	-٧٩٩٫٥٧	٤٩٠٫١٦	٥٫٥٦٠١	١٠٫٤٢٥٧
-٦	٠٫٠٣٤٠٢٠	٠٫٣٦٠٧٦	٦٤٦٫٦٨	-٧٩٠٫٤٠	٤٩٢٫٥٠	٥٫٥٩٤٤	١٠٫٣٩٨١
-٤	٠٫٠٣٦٧٧٧	٠٫٣٣٥١٤	٦٤٤٫٠١	-٧٨١٫٢١	٤٩٤٫٧٩	٥٫٦٢٨٥	١٠٫٣٧٠٨
-٢	٠٫٠٣٩٧٠٨	٠٫٣١١٦٨	٦٤١٫٣٣	-٧٧١٫٩٩	٤٩٧٫٠١	٥٫٦٦٢٥	١٠٫٣٤٤٠
٠	٠٫٠٤٢٨١٨	٠٫٢٩٠١٩	٦٣٨٫٦٣	-٧٦٢٫٧٥	٤٩٩٫١٨	٥٫٦٩٦٣	١٠٫٣١٧٦
٢	٠٫٠٤٦١١٥	٠٫٢٧٠٤٦	٦٣٥٫٩١	-٧٥٣٫٤٨	٥٠١٫٢٨	٥٫٧٢٩٩	١٠٫٢٩١٦
٤	٠٫٠٤٩٦٠٧	٠٫٢٥٢٣٣	٦٣٣٫١٧	-٧٤٤٫١٩	٥٠٣٫٣٣	٥٫٧٦٣٣	١٠٫٢٦٦٠
٦	٠٫٠٥٣٣٠٢	٠٫٢٣٥٦٤	٦٣٠٫٤٠	-٧٣٤٫٨٧	٥٠٥٫٣٠	٥٫٧٩٦٦	١٠٫٢٤٠٧
٨	٠٫٠٥٧٢٠٦	٠٫٢٢٠٢٧	٦٢٧٫٦٢	-٧٢٥٫٥٢	٥٠٧٫٢٢	٥٫٨٢٩٨	١٠٫٢١٥٨

** النقطة الثلاثية

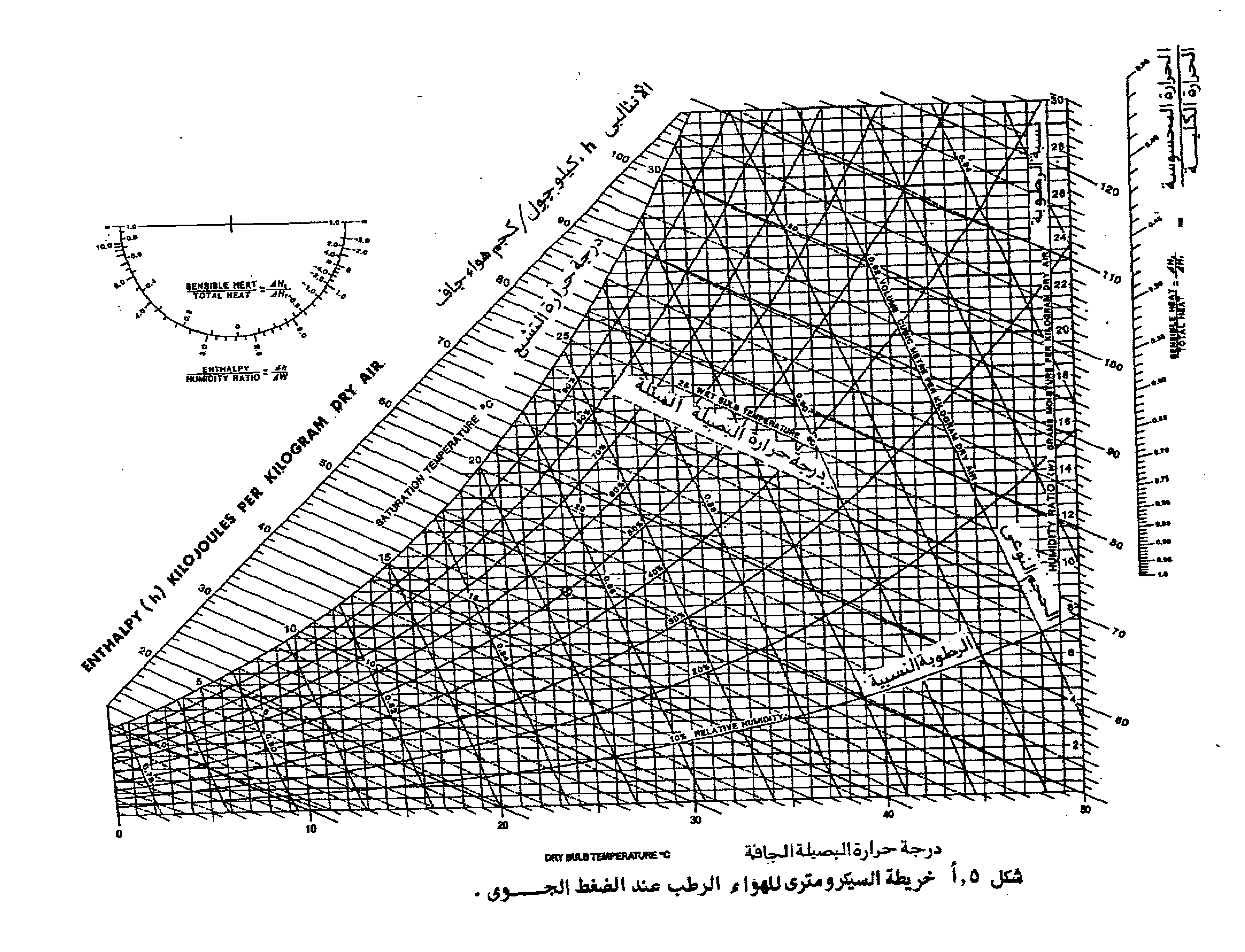
جدول أ,٤ ..... تابع

درجة الحرارة ° م	الضغط ميجابسكال	حجم البخار م٣/كجم	كثافة السائل كجم/م٣	انثالبي: سائل كيلوجول/كجم	انثالبي: بخار كيلوجول/كجم	انتروبي: سائل كيلوجول/كجم ك	انتروبي: بخار كيلوجول/كجم ك
١٠	٠,٦١٣٢٩	٠,٢٠٦١٠	٦٢٤,٨١	-٧١٦,١٤	٥٠٩,٠٦	٥,٨٦٢٨	١٠,١٩١٢
١٢	٠,٦٥٦٧٨	٠,١٩٣٠١	٦٢١,٩٨	-٧٠٦,٧٤	٥١٠,٨٤	٥,٨٩٥٦	١٠,١٦٦٩
١٤	٠,٧٠٢٦١	٠,١٨٠٩١	٦١٩,١٣	-٦٩٧,٣٠	٥١٢,٥٤	٥,٩٢٨٣	١٠,١٤٢٩
١٦	٠,٧٥٠٨٧	٠,١٦٩٧١	٦١٦,٢٥	-٦٨٧,٨٤	٥١٤,١٨	٥,٩٦٠٩	١٠,١١٩٣
١٨	٠,٨٠١٦٤	٠,١٥٩٣٣	٦١٣,٣٥	-٦٧٨,٣٤	٥١٥,٧٤	٥,٩٩٣٤	١٠,٠٩٥٩
٢٠	٠,٨٥٥٠١	٠,١٤٩٧١	٦١٠,٤٢	-٦٦٨,٨٢	٥١٧,٢٢	٦,٠٢٥٧	١٠,٠٧٢٧
٢٢	٠,٩١١٠٦	٠,١٤٠٧٧	٦٠٧,٤٦	-٦٥٩,٢٦	٥١٨,٦٢	٦,٠٥٧٨	١٠,٠٤٩٩
٢٤	٠,٩٦٩٨٧	٠,١٣٢٤٧	٦٠٤,٤٨	-٦٤٩,٦٧	٥١٩,٩٥	٦,٠٨٩٩	١٠,٠٢٧٢
٢٦	١,٠٣١٥	٠,١٢٤٧٤	٦٠١,٤٧	-٦٤٠,٠٥	٥٢١,١٩	٦,١٢١٨	١٠,٠٠٤٨
٢٨	١,٠٩٦٢	٠,١١٧٥٥	٥٩٨,٤٣	-٦٣٠,٣٩	٥٢٢,٣٥	٦,١٥٣٦	٩,٩٨٢٦
٣٠	١,١٦٣٨	٠,١١٠٨٤	٥٩٥,٣٦	-٦٢٠,٧٠	٥٢٣,٤٢	٦,١٨٥٣	٩,٩٦٠٦
٣٢	١,٢٣٤٦	٠,١٠٤٥٨	٥٩٢,٢٧	-٦١٠,٩٧	٥٢٤,٤٠	٦,٢١٦٩	٩,٩٣٨٧
٣٤	١,٣٠٨٦	٠,٠٩٨٧٤	٥٨٩,١٤	-٦٠١,٢١	٥٢٥,٢٨	٦,٢٤٨٤	٩,٩١٧١
٣٦	١,٣٨٥٩	٠,٠٩٣٢٨	٥٨٥,٩٨	-٥٩١,٤١	٥٢٦,٠٨	٦,٢٧٩٨	٩,٨٩٥٥
٣٨	١,٤٦٦٧	٠,٠٨٨١٧	٥٨٢,٧٨	-٥٨١,٥٧	٥٢٦,٧٧	٦,٣١١١	٩,٨٧٤٢
٤٥	١,٧٧٧٥	٠,٠٧٢٧٠	٥٧١,٣٤	-٥٤٦,٨١	٥٢٨,٣٩	٦,٤١٩٨	٩,٨٠٠٣
٥٠	٢,٠٢٨١	٠,٠٦٣٥٧	٥٦٢,٨٨	-٥٢١,٦٤	٥٢٨,٧٢	٦,٤٩٧٠	٩,٧٤٨٣
٥٥	٢,٣٠٤٣	٠,٠٥٥٧٣	٥٥٤,١٧	-٤٩٦,١٦	٥٢٨,٢٩	٦,٥٧٣٧	٩,٦٩٦٥
٦٠	٢,٦٠٧٨	٠,٠٤٨٩٦	٥٤٥,١٨	-٤٧٠,٣٣	٥٢٧,٠٤	٦,٦٥٠١	٩,٦٤٤٨
٦٥	٢,٩٤٠٣	٠,٠٤٣١١	٥٣٥,٨٧	-٤٤٤,١١	٥٢٤,٩١	٦,٧٢٦٤	٩,٥٩٢٩
٧٠	٣,٣٠٣٤	٠,٠٣٨٠١	٥٢٦,٢١	-٤١٧,٤٣	٥٢١,٨٠	٦,٨٠٢٧	٩,٥٤٠٧
٧٥	٣,٦٩٩١	٠,٠٣٣٥٥	٥١٦,١٥	-٣٩٠,٢٣	٥١٧,٦٣	٦,٨٧٩٢	٩,٤٨٧٨
٨٠	٤,١٢٩٢	٠,٠٢٩٦٣	٥٠٥,٦٢	-٣٦٢,٤٢	٥١٢,٢٧	٦,٩٥٦١	٩,٤٣٣٨
٨٥	٤,٥٩٥٦	٠,٠٢٦١٨	٤٩٤,٥٥	-٣٣٣,٨٩	٥٠٥,٥٧	٧,٠٣٣٧	٩,٣٧٨٥
٩٠	٥,١٠٠٥	٠,٠٢٣١٢	٤٨٢,٨٣	-٣٠٤,٥٠	٤٩٧,٣٥	٧,١١٢٣	٩,٣٢١٢
٩٥	٥,٦٤٦٢	٠,٠٢٠٣٩	٤٧٠,٣٣	-٢٧٤,٠٩	٤٨٧,٣٧	٧,١٩٢٤	٩,٢٦١٥
١٠٠	٦,٢٣٥١	٠,٠١٧٩٥	٤٥٦,٨٧	-٢٤٢,٤١	٤٧٥,٣٠	٧,٢٧٤٤	٩,١٩٨٦
١٠٥	٦,٨٦٩٨	٠,٠١٥٧٤	٤٤٢,١٩	-٢٠٩,١٥	٤٦٠,٦٦	٧,٣٥٩٢	٩,١٣١٢
١١٠	٧,٥٥٢٣	٠,٠١٣٧٣	٤٢٥,٩٤	-١٧٣,٨٢	٤٤٢,٧٧	٧,٤٤٧٩	٩,٠٥٧٨
١١٥	٨,٢٨٩٢	٠,٠١١٨٨	٤٠٧,٤٩	-١٣٥,٦٧	٤٢٠,٥٣	٧,٥٤٢٢	٨,٩٧٥٧
١٢٠	٩,٠٨١٦	٠,٠١٠١٤	٣٨٥,٧٩	-٩٣,٣٤١	٣٩٢,٠٢	٧,٦٤٥٤	٨,٨٨٠٥
١٢٥	٩,٩٣٥٨	٠,٠٠٨٤٥٦	٣٥٨,٤٧	-٤٣,٨١١	٣٥٣,٤٢	٧,٧٦٤٨	٨,٧٦٢٩
١٣٠	١٠,٨٦٠	٠,٠٠٦٧٠١	٣١٧,٣٩	٢٣,٦٣٦	٢٩٤,٨٦	٧,٩٢٦٣	٨,٥٩٩٣
*١٣٢,٣	١١,٣٠	٠,٠٠٤٣٦	٢٣٥,٠٠	١٤٢,٧	١٤٢,٧	٨,٢١٧	٨,٢١٧

* النقطة الحرجة



شكل ٤،أ خريطة الضغط-الأنثالبى للأمونيا (مبرد ٧١٧)



شكل ٥,١أ خريطة السيكرومترى للهواء الرطب عند الضغط الجــــوى .

ملحق ب

معاملات تحويل وحدات النظام الدولي

أ.ب معاملات التحويل

اضرب			في	للحصول على		
اسم الوحدة	رمزها العربي	رمزها الأجنبي		اسم الوحدة	رمزها العربي	رمزها الأجنبي
بار		bar	١٠٠	كيلوبسكال		kPa
بار		bar	١٠٠٠٠٠	بسكال		Pa
بوصة		in	٢٥,٤	مليمتر	مم	mm
بوصة		in	٢٥,٤	سنتيمتر	سم	cm
بوصة زئبق		in Hg	٣,٣٨	كيلوبسكال		kPa
بوصة ماء		in H_2O	٢٤٩	بسكال		Pa
جالون أمريكي			٣,٧٩	لتر	ل	L
جالون/دقيقة		gpm	٠,٠٠٦٣١	لتر/ثانية	ل/ث	L/s
جالون/ساعة		gph	١,٠٥	مليلتر/ثانية	مل/ث	mL/s
حصان		hp	٠,٧٤٦	كيلووات		kW
درجة حرارة رانكن		R	٠,٥٥٥٦	درجة حرارة مطلقة	ك	K
رطل/بوصة^2		psi	٦,٨٩	كيلوبسكال		kPa
رطل/ساعة		lb/h	٠,١٢٦	جرام/ثانية	جم/ث	g/s
رطل (قوة)		lb_f	٤,٤٥	نيوتن		N
رطل (كتلة)		lb	٠,٤٥٤	كيلوجرام	كجم	kg
طن تبريد		TR	٣,٥٢	كيلووات		kW

اضرب			في	للحصول على		
اسم الوحدة	رمزها العربي	رمزها الأجنبي		اسم الوحدة	رمزها العربي	رمزها الأجنبي
فرق درجة حرارة فهرنهيت	°ف	°F	٠,٥٥٥٦	فرق درجة حرارة مئوية	°م	°C
قدم		ft	٣٠,٤٨	سنتيمتر	سم	cm
قدم		ft	٠,٣٠٤٨	متر	م	m
قدم/ثانية		ft/s	٠,٣٠٤٨	متر/ثانية	م/ث	m/s
قدم مكعب/دقيقة		ft^3/min	٠,٤٧٢	لتر/ثانية		L/s
كيلومتر/ساعة		km/h	٠,٢٧٨	متر/ث	م/ث	m/s
ملعقة أكل			١٥	مليلتر	مل	mL
ملعقة شاي			٥	مليلتر	مل	mL
مليمتر زئبق		mm Hg	٠,١٣٣	كيلوبسكال		kPa
مليمتر ماء		mm H_2O	٩,٨٠	بسكال		Pa
ميجاجول		MJ	٣,٦٠	كيلووات – ساعة		kW.hr
ميل			١,٦١	كيلومتر	كم	km
وحدة حرارة بريطانية		Btu	١,٠٥٥	كيلوجول		kJ
وحدة حرارة بريطانية/رطل		Btu/lb	٢,٣٢٦	كيلوجول/كيلوجرام		kJ/kg
وحدة حرارة بريطانية/ (رطل . درجة فهرنهيت)		Btu/lb.°F	٤,١٩	كيلوجول/(كيلوجرام درجة مئوية)		kJ/kg.°C
وحدة حرارة بريطانية/ساعة		Btu/hr	٢٩٣	وات		W

اضرب			في	للحصول على		
اسم الوحدة	رمزها العربي	رمزها الأجنبي		اسم الوحدة	رمزها العربي	رمزها الأجنبي
وحدة حرارة بريطانية/قدم^{٢}		Btu/ft^2	١١.٤	كيوجول/متر^{٢}		kJ/m^2
وحدة حرارة بريطانية/(قدم^{٢}ساعة)		$Btu/ft^2.hr$	٣.١٥	وات/متر^{٢}		W/m^2
وحدة حرارة بريطانية/قدم^{٢} . (ساعة . درجة فهرنهيت)		$Btu/ft^2.hr.^oF$	٥.٦٨	وات/(متر^{٢} . درجة مئوية)		$W/m^2 . ^oC$

كب تحويل درجات الحرارة

درجة حرارة مطلقة = درجة حرارة مئوية + ١٥ . ٢٧٣

درجة حرارة مئوية = (درجة حرارة فهرنهيت – ٣٢) × $\frac{٥}{٩}$

فرق درجة حرارة مئوية = فرق درجة حرارة فهرنهيت × $\frac{٥}{٩}$

فرق درجة حرارة مطلقة = فرق درجة حرارة مئوية

درجة حرارة مطلقة = درجة حرارة رانكن × $\frac{٥}{٩}$

ملحق جـ

ثبت المصطلحات

عربي / إنجليزي

أ

اتساخ	fouling
أحادي المرحلة	single stage
أديباتي	adiabatic
أداء متذبذب	surge performance
إذابة الصقيع	defrost
إرغاء	foaming
إزاحة الكباس	piston displacement
أنبوب شعري	capillary tube
انتقالية	transmissibility
أنتروبيا	entropy
أنثالبي	enthalpy
انحراف استاتيكي	static deflection
انضغاط	compression
أيزنتروبي	isentropic

ب

برج تبريد	cooling tower
بصيلة	bulb

بصيلة بعيدة	remote bulb

ت

تأثير تبريدي	refrigeration effect
تبريد بانضغاط البخار	vapour compression refrigeration
تبريد تحتي	subcooling
تحميل أسطوانة	cylinder loading
تحميل زائد	overload
تسخين فوقي	superheating
تفريغ أسطوانة	cylinder unload

ث

ثرموستات	thermostat

ج

جليكول الإيثيلين	ethylene glycol
جليكول البروبيلين	propylene glycol

ح

حجم نوعي	specific volume
حرارة كامنة	latent heat
حرارة نوعية	specific heat
حمل التصميم	design load
حمل حر	free convection
حمل حراري	thermal load
حمل طبيعي	natural convection

خ

خنق	throttling
خنق ضغط السحب	suction pressure throttling

د

درجة حرارة البصيلة الجافة	dry bulb temperature
درجة حرارة البصيلة المبتلة	wet bulb temperature
درجة حرارة التشبع	saturation temperature
درجة حرارة نقطة الندى	dew point temperature
دفاعة	impeller
دوار	rotor
ديسبل	decibel
دينامي	dynamic

ر

رطوبة نسبية	relative humidity
رقم ماخ	Mach number
الرقم الهيدروجيني	pH

رقم رينولدز — Reynolds number

س

سريان متذبذب — surge flow
سريان مخنوق — choked flow
سطح ممتد — extended surface
سعة التبريد — cooling capacity

ش

شحنة مازة — adsorption charge
شطلان — hunting
شعلة الهاليد — halide torch

ص

صمام تمدد — expansion valve
صمام تمدد اوتوماتي — automatic expansion valve
صمام تمدد ثرموستاتي — thermostatic expansion valve
صمام سحب — suction valve
صمام طرد — discharge valve
صمام عوامة — float valve
صمام غير مرجع — check valve
صمام ملف لولبي — solenoid valve
صمام لارجعي — non-return valve
صلبية العازل — stiffness of isolator

ض

ضاغط ترددي — reciprocating compressor
ضاغط دوراني — rotary compressor
ضاغط طرد مركزي — centrifugal compressor
ضاغط لولبي — screw compressor
ضاغط محكم الغلق — hermetic compressor
ضاغط مفتوح — open-type compressor
ضاغط موجب الإزاحة — positive displacement compressor
ضاغط نصف محكم الغلق — semi-hermetic compressor
ضغط — pressure
ضغط البخار — vapour pressure

ط

طن تبريد — refrigeration ton

ع

عامل تجنيب — bypass factor

غ

غازات غير قابلة التكثيف — non-condensible gases
غلاف وأنبوب — shell and tube

ف

effectiveness	فعالية
pressure loss	فقد ضغط

ق

power	قدرة
compression power	قدرة انضغاط
operating power	قدرة التشغيل
centrifugal force	قوة طرد مركزي

ك

muffler	كاتم صوت
rolling piston	كباس متدحرج
efficiency	كفاءة
isentropic efficiency	كفاءة ايزنتروبية
polytropic efficiency	كفاءة بوليتروبية
volumetric efficiency	كفاءة حجمية
mechanical efficiency	كفاءة ميكانيكية
relative efficiency	كفاءة نسبية

م

Labyrinth seal	مانع تسرب لابيرنث
heat exchanger	مبادل حراري
evaporator	مبخر
dry expansion evaporator	مبخر جاف التمدد
indirect expansion evaporator	مبخر غير مباشر التمدد
overfed evaporator	مبخر فائض التغذية
direct expansion evaporator	مبخر مباشر التمدد
submerged evaporator	مبخر مغمور
submerged coil evaporator	مبخر مغمور اللف
refrigerant	مبرد
Baudelot cooler	مبرد باديلوت
intercooler	مبرد بيني
liquid cooler	مبرد سائل
air cooler	مبرد هواء
multi stage	متعدد المراحل
accumulator	مجمع
bearing	مَحمل (كرسي تحميل)
receiver	مُستَقبِل
coefficient of performance	معامل أداء
heat transfer coefficient	معامل انتقال الحرارة
conductivity coefficient	معامل التوصيل
heat removal factor	معامل طرد الحرارة
overall heat transfer coefficient	المعامل الكلي لانتقال الحرارة
thermal resistance	مقاومة حرارية
economizer	مُقْتَصِد
condenser	مكثف
double pipe condenser	مكثف الأنبوب المزدوج
evaporative condenser	مكثف تبخيري
shell and tube condenser	مكثف الغلاف والأنبوب
shell and coil condenser	مكثف الغلاف واللف
water cooled condenser	مكثف مبرد بالماء

مكثف مبرد بالهواء	air cooled condenser
موزع مبرد	refrigerant distributer
مؤشر أيزنتروبي	isoentropic index
مؤشر بوليتروبي	polytropic index

ن

ناشرة	diffuser
نسبة الانضغاط	compression ratio
نسبة الرطوبة	humidity ratio
نظام تبريد	refrigeration system
نقطة الندى للجهاز	apparatus dew point

ل

لا انعكاسي	irreversible
لزوجة	viscosity
لزوجة كينماتية	kinematic viscosity

هـ

هالوكربونات	halocarbons

إنجليزي / عربي

a

accumulator مجمع
adiabatic ادياباتي
adsorption charge شحنة مازة
air cooled condenser مكثف مبرد بالهواء
air cooler مبرد هواء
apparatus dew point نقطة الندى للجهاز
automatic expansion valve صمام تمدد أوتوماتي

b

Baudelot cooler مبرد باديلوت
bearing مَحمل (كرسي تحميل)
bulb بصيلة
bypass factor عامل تجنيب

c

capillary tube انبوب شعري
centrifugal compressor ضاغط طرد مركزي
centrifugal force قوة طرد مركزي
check valve صمام غير مرجع
choked flow سريان مخنوق
coefficient of performance معامل أداء
compression انضغاط
compression power قدرة انضغاط
compression ratio نسبة الانضغاط
condenser مكثف
conductivity coefficient معامل التوصيل
cooling capacity سعة التبريد
cooling tower برج تبريد
cylinder loading تحميل أسطوانة
cylinder unload تفريغ أسطوانة

d

decibel ديسبل
defrost إذابة الصقيع
design load حمل التصميم
dew point temperature درجة حرارة نقطة الندى
diffuser ناشرة
direct expansion evaporator مبخر مباشر التمدد
discharge valve صمام طرد
double pipe condenser مكثف الأنبوب المزدوج
dry bulb temperature درجة حرارة البصيلة الجافة
dry expansion evaporator مبخر جاف التمدد
dynamic دينامي

e

economizer مُقتصِد
effectiveness فعالية
efficiency كفاءة

enthalpy.	انثالبي
entropy	انتروبيا
ethylene glycol	جليكول الايثيلين
evaporative condenser	مكثف تبخيري
evaporator	مبخر
expansion valve	صمام تمدد
extended surface	سطح ممتد

f

float valve	صمام عوامة
foaming	ارغاء
fouling	اتساخ
free convection	حمل حر

h

halide torch	شعلة الهاليد
heat exchanger	مبادل حراري
heat removal factor	معامل طرد الحرارة
heat transfer coefficient	معامل انتقال الحرارة
hermetic compressor	ضاغط محكم الغلق
humidity ratio	نسبة الرطوبة
hunting	شططان

i

impeller	دفاعة
indirect expansion evaporator	مبخر غير مباشر التمدد
intercooler	مبرد بيني
irreversible	لا انعكاسي
isentropic	أيزنتروبي
isentropic efficiency	كفاءة أيزنتروبية
isoentropic index	مؤشر أيزنتروبي

l

Labyrinth seal	مانع تسرب لابيرنث
latent heat	حرارة كامنة
liquid cooler	مبرد سائل

m

Mach number	رقم ماخ
mechanical efficiency	كفاءة ميكانيكية
muffler	كاتم صوت
multi stage	متعدد المراحل

n

natural convection	حمل طبيعي
non-condensible gases	غازات غير قابلة التكثيف
non-return valve	صمام لارجعي

o

open-type compressor ضاغط مفتوح
operating power قدرة التشغيل
overall heat transfer coefficient المعامل الكلي لانتقال الحرارة
overfed evaporator مبخر فائض التغذية
overload تحميل زائد

p

pH الرقم الهيدروجيني
piston displacement إزاحة الكباس
polytropic efficiency كفاءة بوليتروبية
polytropic index مؤشر بوليتروبي
positive displacement compressor ضاغط موجب الإزاحة
power قدرة
pressure ضغط
pressure loss فقد ضغط
propylene glycol جليكول البروبيلين

r

receiver مُستقبِل
reciprocating compressor ضاغط ترددي
refrigerant مبرد
refrigerant distributer موزع مبرد
refrigeration ton طن تبريد
relative efficiency كفاءة نسبية
relative humidity رطوبة نسبية
remote bulb بصيلة بعيدة
refrigeration system نظام تبريد
Reynolds number رقم رينولدز
rolling piston كباس متدحرج
rotary compressor ضاغط دوراني
rotor دوار

s

saturation temperature درجة حرارة التشبع
screw compressor ضاغط لولبي
semi-hermetic compressor ضاغط نصف محكم الغلق
refrigeration effect تأثير تبريدي
shell and coil condenser مكثف الغلاف والملف
shell and tube غلاف وأنبوب
shell and tube condenser مكثف الغلاف والأنبوب
single stage أحادي المرحلة
solenoid valve صمام ملف لولبي
specific heat حرارة نوعية
specific volume حجم نوعي
static deflection انحراف استاتيكي
stiffness of isolator صلبية العازل
subcooling تبريد تحتي
submerged coil evaporator مبخر مغمور الملف
submerged evaporator مبخر مغمور
suction pressure throttling خنق ضغط السحب

suction valve	صمام سحب
superheating	تسخين فوقي
surge flow	سريان متذبذب
surge perfermance	أداء متذبذب

t

thermal load	حمل حراري
thermal resistance	مقاومة حرارية
thermostat	ثرموستات
thermostatic expansion valve	صمام تمدد ثرموستاتي
throttling	خنق
transmissibility	انتقالية

v

vapour compression refrigeration	تبريد بانضغاط البخار
vapour pressure	ضغط البخار
volumetric efficiency	كفاءة حجمية

w

water cooled condenser	مكثف مبرد بالماء
wet bulb temperature	درجة حرارة البصيلة المبتلة

المراجع

المراجع العربية

بولس ، صبري (١٩٨٧) ، هندسة التبريد واستعادة الحرارة من عمليات التبريد ، دار المعارف ، القاهرة ، جمهورية مصر العربية .

الرفاعي ، محمد فوزي ، وعادل خليل حسن (١٩٨٨) ، التبريد وتكييف الهواء ، كتاب مترجم ، تأليف أ. ر. تروت ، دار ماكجروهيل للنشر ، الدار الدولية للنشر والتوزيع ، القاهرة ، جمهورية مصر العربية.

السيد ، مصطفى محمد (١٩٨٧) ، تنقية المياه المالحة ، كتاب معرب ، تأليف ك.س.شبيجلر ، مركز النشر العلمي – جامعة الملك عبدالعزيز ، جدة – المملكة العربية السعودية .

السيد ، مصطفى محمد ، و قدري أحمد فتحي ، ومحمد علي درويش (١٩٨٩)، هندسة التبريد وتكييف الهواء ، كلية الهندسة ، جامعة الملك عبدالعزيز ، جدة ، المملكة العربية السعودية .

المراجع الأجنبية

Althouse, A. D., C. H. Turnquist, and A. F. Bracciano (1982), Modern Refrigeration and air conditioning, The Goodheart-Wilcox Company, Inc., Illinois U.S.A.

Ananthanarayanan, P. N. (1982), Basic refrigeration and air conditioning, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, India.

Anderson, M. K. (1987), "Is the sky falling?", ASHRAE J., Vol. 29, No. 11, pp. 20-23.

ASHRAE (1983, 1988), Handbook of equipment, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga, U.S.A.

ASHRAE (1985, 1989), Handbook of fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga, U.S.A.

ASHRAE (1986, 1990), Handbook of refrigeration systems and applications, SI edition, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga, U.S.A.

Bertin, J. J. (1987), Engineering fluid mechanics, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A.

Carrier Corporation (1982), Carrier packaged outdoor air-cooled liquid chillers, Catalog No. 523-031, New York, U.S.A.

Carrier Corporation (1982), Carrier single-package cooling units-with optional electric heat, Catalog No. 525-032, New York, U.S.A.

Cox, J. E. (1987), "The UNEP agreement", ASHRAE J., Vol. 29, No. 11, p 31.

Dossat, R. J. (1981), Principles of refrigeration, SI version, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.

Gahin, S., M. M. Elsayed, and M. A. Ghazi (1985), Introduction to engineering fluid mechanics, King Abdul Aziz University Press, Jeddah, Saudi Arabia.

Gosney, W. B. (1982), Principles of refrigeration, Cambridge University Press, Camridge, U.K.

Harris, N. C. (1983) , Modern airconditioning practice, McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A.

Hopkins, N. E. (1950), Rating the restrictor tube, Refrigerating Engineering, p. 1087.

Kovats, A. (1964), Design and performance of centrifugal and axial flow pumps and compressors, Pergamon Press, London, U.K.

Kreith, F. and W. Z. Black (1980), Basic heat transfer, Harper & Row Publishers, New York, U.S.A.

Langley, B. C. (1986), Refrigeration and Air Conditioning, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., U.S.A.

Nagengast, B. (1988), "A historical look at CFC refrigerants", ASHRAE J., Vol 30, No. 11 pp. 37-39.

Ozisik, M. N. (1985), Heat transfere: a basic approach, McGraw-Hill Book Co., New York, U.S.A.

Parker Hannifin Corporation, Refrigeration Components Group, Condensed catalog, Halocarbon products, Wheeling, IL. U.S.A.

Pita, E.G. (1984), Refrigeration principles and systems: an energy approach, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.

Prasad, M. (1983), Refrigeration and air conditioning, Wiley Eastern Limited, New Delhi, India.

Raznjevic, K. (1976), Handbook of thermodynamic tables and charts, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, U.S.A.

Rohsenow, W. M. and J. P. Hartnett (1973), editors, Handbook of heat transfer, McGraw-Hill Book Co., New York, U.S.A.

Spiegler K. S. and A. D. K. Laird (1980), Principles of desalination, Academic Press, London, U.K.

Sporlan Valve Company (1981), Thermostatic expansion valves, Bulletin 10-10, Sporlan Valve Company, St. Louis, U.S.A.

Stoecker, W. F. and J. W. Jones (1982), Refrigeration and air conditioning, McGraw-Hill International Book Company, New York, U.S.A.

Threlkeld, J. L. (1970), Thermal environmental engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., U.S.A.

Toshiba Corporation (1990), Catalogue No. CW8912EA60 [D-R], Japan.

Trane Air Conditioning (1978), Reciprocating refrigeration, The Train Company, U.S.A.

Tressler, D. K., W. B. Van Arsdel, M. J. Copley, and W. R. Woolrich (1982), The freezing preservation of foods, The AVI publishing Company, Inc., Westport, Connecticut, U.S.A.

Turton, R. K. (1984), Principles of turbomachinery, E & F. N. Spon, New York, U.S.A.

Whitesel, H. A. (1957), "Capillary two-phase flow, Refrigerating Engineering, p. 42, April.

Whitesel, A. A. (1957), Capillary two-phase flow - part II, Refrigerating Engineering, p. 35, Sept.

Whitman, W. and W. M. Johnson (1991), Refrigeration & air conditioning technology, Delmar Publishers Inc., Albany, New York, U.S.A.

الكشاف

أ

ب – ت

ث - خ

د

ر - ش

ط

ع - غ

ف - ق

ك

م

رقم الايداع	٩٣ / ٧١٨٤
الترقيـــم الدولـــي I. S. B. N	977 - 10 - 6060 - 1



الكتاب

يعرض الكتاب الحالى موضوعاً حيويا لمهندسى التبريد وتكييف الهواء وهو المعدات الأساسية لهندسة التبريد، ولقد أعد الكتاب الحالى ليكون مرجعا دراسياً لطلاب كلية الهندسة والمعاهد التقنية العليا، وأيضا ليكون مرجعا لمهندسى التبريد وتكييف الهواء، سواء كان عمل هؤلاء المهندسين فى التصميم، أو المقاولات، أو الصيانة لعمليات التبريد فى الصناعات المختلفة أو فى هندسة تكييف الهواء.

يحوى هذا الكتاب الآتى :

- تطبيقات هندسة التبريد.
- نظم التبريد بانضغاط البخار، موائع التبريد (المبردات)، اختبار التسرب ونظم شحن المبرد، الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار، النظم أحادية المرحلة والمتعددة المراحل.
- المبخرات : أنواعها، مبخرات الهواء ومبخرات السوائل، تصميمها، الحمل الحرارى، أداء المبخرات واختبارها، طرق إذابة الصقيع.
- المكثفات : أنواعها، الحمل الحرارى، المكثفات المبردة بالماء، المكثفات المبردة بالهواء، المكثفات التبخيرية، صيانة المكثفات، الغازات غير قابلة التكثيف، التحكم فى ضغط المكثف.
- الضواغط الترددية : أنواعها، فكرة التشغيل، الكفاءة الحجمية، التزييت، التحكم فى سعة التبريد، التثبيت، التهوية، الاهتزاز، الضوضاء.
- الضواغط الدورانية : فكرة التشغيل، الكفاءة الحجمية، التزييت، التحكم فى سعة التبريد.
- الضواغط اللولبية : فكرة التشغيل، التزييت، التحكم فى سعة التبريد.
- ضواغط الطرد المركزى : فكرة التشغيل، أداؤها، التزييت، الضغط الحرج، الأداء المتذبذب، التحكم فى سعة التبريد.
- صمامات التمدد : صمام التمدد الثرموستاتى، شحن البصيلة، صمام التمدد الثرموستاتى المعادل خارجيا، الشطظان، اختيار صمام التمدد الثرموستاتى، صمام التمدد الأوتوماتى، صمام التمدد الكهربائى، تصميم واختيار الأنبوب الشعرى.
- خرائط وجداول المبردات.



الدكتور / مصطفى محمد السيد

- من مواليد الفيوم فى عام ١٩٤٨.
- حصل على بكالوريوس الهندسة الميكانيكية من كلية الهندسة - جامعة القاهرة فى ١٩٧٠ وكان ترتيبه الأول على الخريجين.
- حصل على درجة الماجستير من هندسة القاهرة فى عام ١٩٧٣، ودرجة الدكتوراه من الولايات المتحدة الأمريكية فى عام ١٩٧٦.
- يعمل حاليا استا ... ة الميكانيكية بجامعة ا ... ز بجده.
- له ما يزيد عن ست ... هندسة تحلية المياه، و ... الهواء والطاقة الشم ... المجلات العلمية الدولية ...
- له عدة كتب باللغة العربية واللغة الإنجليزية فى التخصصات الهندسية السابقة.